

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки

(повна назва факультету / інституту)

Кафедра мікроелектроніки

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ” 20__ р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

з напряму підготовки 6.050801. «Мікро- та наноелектроніка»,
(код і назва)

на тему: Фотодіод на основі InSb з використанням імплантації іонів магнію

Виконав: студент IV курсу, групи ДП-51
(шифр групи)

Кульбачинський Олександр Анатолійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник Асистент, Королевич Любомир Миколайович
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант з технологічних питань доц., к.т.н., Івашук А. В.
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Консультант з нормоконтролю доц., к.т.н., Орлов А. Т.
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Консультант з інформаційних питань ст. викл., к.т.н. Діденко Ю. В.
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає запозичень
з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

РЕФЕРАТ

Роботу викладено на 57 сторінках, вона містить 4 розділи, 28 ілюстрацій, 2 таблиці та 16 джерел в переліку посилань.

Об'єктом дослідження став фоточутливий елемент на основі InSb утворений з імплантацією іонів магнію.

Предмет роботи – профіль розподілу імплантованої домішки, профіль розподілу дефектів, вольт-амперні характеристики фоточутливого елемента.

Метою даної роботи є створення фоточутливого елемента на основі n-InSb, який працює при 77 K, та удосконалення його технологічного маршруту.

У першому інформаційно-аналітичному розділі роботи коротко надано відомості про сенсори на основі InSb.

У другому розділі викладена інформація про основні процеси технологічного маршруту.

У третьому розділі описано конструкцію та технологічний маршрут виготовлення фотодіода.

У четвертому розділі викладені результати моделювання профілів розподілу на програмному забезпеченні SRIM, досліджень профілів розподілу та ВАХ.

ABSTRACT

The work is described on page 57, it contains 4 sections, 28 illustrations, 2 tables and 16 sources in the list of references.

The subject of the study was a photosensitive element based on InSb formed with the implantation of magnesium ions.

Subject of work - profile distribution of implanted impurities, profile of distribution of defects, volt-ampere characteristics of the photosensitive element.

The purpose of this work is to create a photo-sensitive element based on n-InSb, which operates at 77 K, and to improve its technological route.

In the first information-analytical section of the work, brief information is provided on InSb-based sensors.

The second section describes the main processes of the technological route.

The third section describes the design and technological route for the production of a photodiode.

In the fourth section, the results of modeling distribution profiles on software SRIM, distribution profile analysis and VAC are outlined.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.....	5
Вступ.....	6
1. Загальний аналіз фотодіодів та основи фізичних процесів детектування випромінювання.....	8
1.1. Загальний аналіз.....	8
1.2. Внутрішній фотоефект.....	10
1.3. Теплове випромінювання.....	15
1.4. Мішені і фони.....	17
2. Виготовлення фотодіодів.....	20
2.1. Полірування підкладок InSb.....	20
2.1.1. Хіміко-механічне полірування підкладок.....	20
2.1.2. Хіміко-динамічне полірування підкладок.....	21
2.2. Іонна імплантація.....	24
2.2.1. Особливості та можливості методу іонної імплантації.....	24
2.2.2. Устаткування для іонного легування.....	28
2.3. Мас-спектроскопія вторинних іонів (BIMC).....	34
2.4. Відпал.....	36
3. Розробка конструкції і технології виготовлення фотодіодів.....	38
3.1. Опис конструкції фотодіода.....	38
3.2. Технологічний маршрут виготовлення фотодіода.....	42
4. Результати досліджень.....	48
4.1. Розрахунок профілів впровадженої домішки методом Монте-Карло.....	48

4.2. Дослідження профілів розподілу берилію в імплантованих зразках.....	51
4.3.Дослідження ВАХ отриманих фотодіодів.....	53
Висновки.....	56
Список використаних джерел.....	57
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	

- ФЧЕ – фоточутливий елемент
- ФЕП – фотоелектричний перетворювач
- ЕОМ – електронно-обчислювальна машина
- ОПЗ – область просторового заряду
- ХМП – хіміко-механічне полірування
- ХДП – хіміко-динамічне полірування
- ДІ – деіонізований
- ВПК – воєнно промисловий комплекс
- PECVD – плазмо-хімічне осадження з газової фази
- РТА – швидкий термічний відпал
- ВІМС – мас-спектрометрія вторинних іонів
- РФЕС – рентгенівської фотоелектронної спектроскопії

ВСТУП

На сьогоднішній день фотоприймачі широко використовуються у багатьох галузях промисловості - від побутових пристроїв до ВПК. Це обумовлено сенсоризацією виробничої діяльності, тобто заміна органів чуття людини на сенсори. Потреба у вимірювальних приладах стрімко росте у зв'язку з швидким розвитком автоматизованих систем керування й контролю, впровадженням сучасних технологічних процесів, переходом до автоматизованих виробництв. В еру бурхливого розвитку оптоелектроніки вартість сенсорів швидко падає, що дозволяє їх використовувати в залежності від поставленої задачі для побудови широкого класу спеціалізованих оптико-електронних вимірювальних пристроїв і систем із високими технічними характеристиками.

Фотоприймачі – великий клас пристроїв, які фіксують електромагнітне випромінювання і перетворюють його у електричний сигнал. Основою фотоелектричного ефекту являється поглинання енергії фотона, яке супроводжується переходом носіїв заряду на більш високий енергетичний рівень. Загалом за принципом роботи фотоприймачі ділять на дві групи: які працюють на зовнішньому фотоэффекті та на внутрішньому. Для вимірювання енергетичних параметрів випромінювання більш широкого поширення набули фотодіоди. Спектральний діапазон чутливості фотодіода визначається шириною забороненої зони матеріалу та глибиною залягання домішкових рівнів. В даній роботі розглядається фотоприймач на внутрішньому фотоэффекті, а саме фотодіод на антимоніді індію з використанням імплантації іонів магнію.

Антимонід індію має високу квантову ефективність - близько 80-90% (відношення фотогенерованих електронно-діркових пар до числа падаючих фотонів). Їх суттєвими перевагами у порівнянні із фотодіодами на основі сполуки $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x = 0.3$) є більш висока стабільність, технологічність виготовлення, а також висока структурна досконалість монокристалічного матеріалу. Недоліком є висока нестабільність: характеристики детектора, як правило, дрейфують у часі. Через цю нестійкість, детектори рідко використовуються в метрології. Через вузькість забороненої зони, детектори, в яких, в якості напівпровідникового матеріалу застосовується антимонід індію, вимагають глибоке охолодження, так як вони можуть працювати тільки при кріогенних температурах (як правило, 77 K).

Спочатку р-n переходи в InSb створювались за допомогою дифузії атомів Zn та Cd в підкладку n-типу з об'ємною концентрацією донорів $10^{14} - 10^{15} \text{см}^{-3}$ (при 77 K). Однак згодом було виявлено, що Zn та Cd створюють пористу структуру, яку складно видалити. Для вирішення цієї проблеми запропоновано використовувати імплантацію іонів Mg та Be. Хоча через більшу атомну масу магній і створює більшу кількість радіаційних дефектів, проте в даній роботі досліджується він тому, що Be є відносно дорогим, а головне високотоксичним елементом. Це несе в собі непотрібні ризики при виготовленні фотодіодів.

1.ЗАГАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ФОТОДІОДІВ ТА ОСНОВИ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ДЕТЕКТУВАННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ

1.1.Загальний аналіз

В фотодіоді є збіднена область напівпровідника з сильним електричним полем, в якому відбувається поділ електронно-діркових пар, порушених під дією світла. Для роботи фотодіода на високих частотах необхідно забезпечити малі часи прольоту, тому збіднена область повинна бути тонкою. З іншого боку, для збільшення квантової ефективності збіднений шар повинен бути достатньо товстим, щоб забезпечити поглинання більшої частини падаючого випромінювання. Таким чином, існує взаємозв'язок між швидкодією і квантової ефективністю. Фотодіод може працювати в фотовольтаїчному режимі, характерному для сонячних батарей. Однак конструктивно фотодіод істотно відрізняється від сонячної батареї. В роботі фотодіода визначальну роль грає лише випромінювання, зосереджене в вузькому інтервалі довжин хвиль в центрі оптичного діапазону, а сонячні батареї повинні мати високу чутливість в широкому діапазоні довжин хвиль сонячного випромінювання. Фотодіоди мають малі розміри, необхідні для мінімізації ємності переходу, тоді як сонячні батареї відносяться до приладів з великою площею. Однією з найбільш важливих характеристик фотодіодів є квантова ефективність, тоді як якість сонячних батарей в основному оцінюється за ефективністю перетворення потужності (потужність, що виділяється на навантаженні, віднесена до потужності падаючого сонячного випромінювання).

При роботі в видимому і ближньому інфрачервоному діпазонах діоди зазвичай зміщуються в зворотному напрямку за допомогою порівняльно великої напруги, щоб зменшити час прольоту носіїв і знизити ємність переходу. Напруга зміщення, однак, не настільки велика, щоб викликати лавинний пробій. Цим обмеженням на величину зсуву відрізняються фотодіоди, які ми розглядаємо, від лавинних фотодіодів, в яких внутрішнє підсилення досягається саме за рахунок ударної іонізації в умовах лавинного пробію. У сімейство фотодіодів входять діоди з $p-n$ переходом, $p-i-n$ -діоди, діоди зі структурою метал – напівпровідник (з бар'єром Шотткі) і діоди з гетеропереходом.

Квантова ефективність, як уже говорилося вище, представляє собою число фотогенерованих електронно-діркових пар, віднесене до числа падаючих фотонів:

$$\eta = \left(\frac{I_p}{q}\right) / \left(\frac{P_{opt}}{h\nu}\right) \quad (1.1)$$

де I_p - фотострум, зумовлений поглинанням падаючого оптичного випромінювання з потужністю P_{opt} і довжиною хвилі λ (яка відповідає енергії фотона $h\nu$). Порівняльним критерієм якості є чутливість, яка визначається як відношення фотоструму до оптичної потужності. Також одним з основних факторів, що визначають квантову ефективність, є коефіцієнт поглинання.

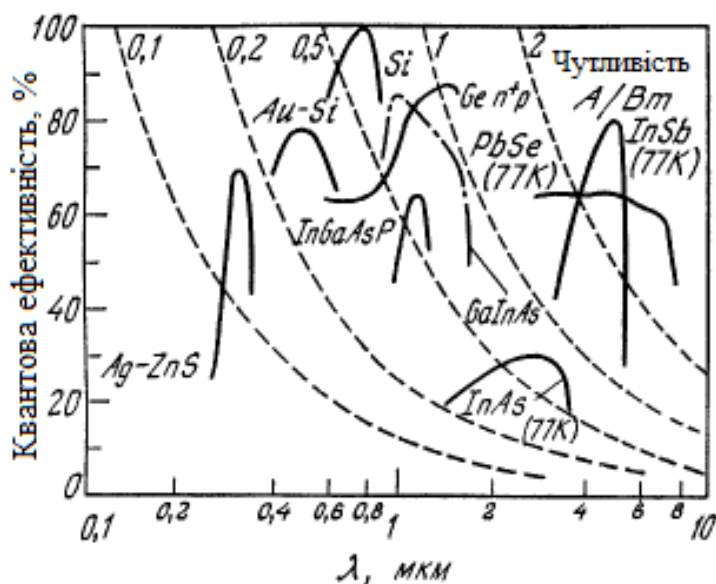


Рисунок – 1.1. Залежності квантової ефективності і чутливості (штрихова крива) різних фотодетекторів від довжини хвилі випромінювання[1].

Короткохвильова межа фотовідповіді обумовлена тим, що в області коротких хвиль випромінювання поглинається в близькості до поверхні, де час рекомбінації малий. Внаслідок цього фотоносії рекомбінують раніше, ніж йдуть з поверхневого шару. На Рис. 1.1. при наведені типові залежності квантової ефективності від довжини хвилі для деяких височастотних фотодіодів і криві квантової ефективності, що відповідають заданим значенням чутливості, В ультрафіолетовій і видимих областях спектра високої квантової ефективністю володіють фотодіоди зі структурою метал-напівпровідник. У ближньому ІЧ-діапазоні (на довжинах хвиль $\sim 0,8-0,9$ мкм) в кремнієвих фотодіодах з покриттям може бути досягнута квантова ефективність 100%. В області довжин для хвиль 1,0-1,6 мкм високою квантової ефективністю характеризуються фотодіоди на Ge, а також на основі потрійних (наприклад, Ga InAs) і четверні (наприклад, GaInAsP) з'єднань елементів III і V груп. Для забезпечення високоефективної роботи в довгохвильовій області фотодіоди охолоджуються до низьких температур (наприклад, до 77 K).

Швидкість фотовідповіді обмежується трьома факторами: дифузією носіїв, часом дрейфу через збіднену область і ємністю збідненої області. Носії, генеровані за границею збідненої області, повинні дифундувати до переходу, що істотно збільшує час затримки. Щоб зменшити вплив дифузії, необхідно формувати перехід поблизу поверхні. Основна частина випромінювання поглинається в тому випадку, коли збіднена область досить широка; при досить високих зворотних зсувах дрейф носіїв здійснюється зі швидкістю насичення. Збіднений шар, проте, не повинен бути надто широким, інакше час перенесення буде обмежувати швидкість фотовідповіді.

1.2. Внутрішній фотоефект.

Розглянемо фізичні основи і принцип дії приймальних первинних вимірювальних перетворювачів (ПВП) випромінювання на основі внутрішнього

фотоефекту. Сам внутрішній фотоефект визначимо тут в двох формах як індуковану оптичним випромінюванням іонізацію атомів світлочутливого матеріалу, що приводить або до зростання провідності в однорідному напівпровіднику, або до генерації струму через р-n-перехід в напівпровіднику неоднорідному. Електрони іонізації зазвичай називають фотоелектронами, іони – дірками; їх струм – електронний та дірковий компонентами фотоструму. Відповідно прийомним ПВП на внутрішньому фотоефекті буде називатися твердотільний напівпровідниковий прилад, в якому концентрація вільних носіїв заряду (фотоелектронів і дірок) визначає струм від зовнішнього джерела напруги (фоторезистор) або струм у зовнішньому навантаженні (фотодіод).

Якісний опис фоторезистивного ефекту наведемо в термінах і категоріях зонної теорії. Зонна теорія пов'язує властивості напівпровідника з знаходженням його електронів в певному діапазоні енергій – енергетичній зоні. У напівпровідниках будь-якого типу енергії у вільних і у пов'язаних кристалічною решіткою електронів сильно відрізняються. Для наочності проілюструємо це графічно - на рис.1.2 і 1.3. наведені три енергетичні діаграми для різних типів напівпровідників.

На рис. 1.2. рівень E_c - це найменша енергія, якою можуть володіти вільні електрони. Над E_c розташовуються інші можливі значення енергії вільних електронів. Сукупність значень $E \geq E_c$ формує так звану енергетичну зону провідності. Рівень E_v - це найбільша енергія, яку може мати електрон власного напівпровідника, що знаходиться в зв'язаному стані.

Всі ті електрони, значення енергії яких розташовується під E_v , асоційовані з атомами. Сукупність значень $E \leq E_v$ формує так звану валентну енергетичну зону. Таким чином, щоб іонізувати атом власного напівпровідника - перевести хоча б один його електрон із зв'язаного стану у вільний - фотону необхідно забезпечити його енергією $h\nu$, Що перевищує $E_c - E_v = \Delta E_g$. Енергія ΔE_g , іменована шириною забороненої зони власного напівпровідника, визначається його хімічною природою. У Se $\Delta E_g = 1,60$ eB; Si $\Delta E_g = 1,12$ eB; Ge $\Delta E_g = 0,75$ eB. У власному напівпровіднику кожен поглинутий фотон

достатньої енергії $h\nu \geq \Delta E_g$ породжує електрон-діркову пару, а надлишок наявної у фотона енергії йде при цьому на нагрів, який, до речі, також відбувається дискретно (передачею напівпровідника теплових квантів - фононів). Для власного напівпровідника характерний електронно-дірковий тип провідності. Теоретично варіювати фотопровідність можна, ініціюючи перехід електронів з валентної зони в зону провідності (виросте власна провідність - рис. 1.2.). Однак практичного шляху реалізації цього механізму поки не знайдено.

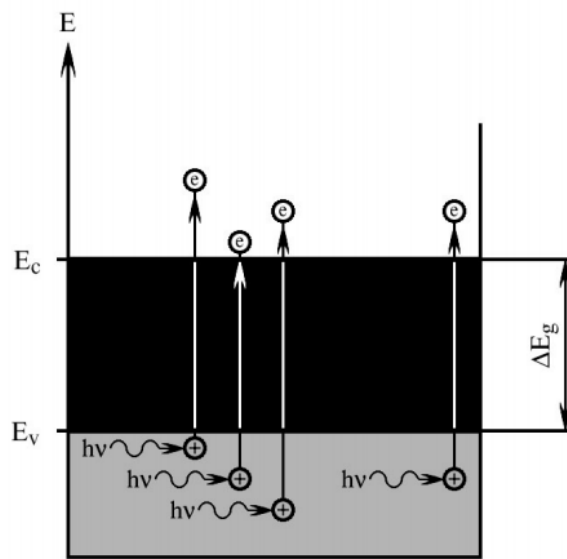


Рисунок 1.2. – Енергетична діаграма напівпровідника з власною провідністю. Позначення: $h\nu$ - фотон, \ominus - електрон, \oplus - дірка; білим кольором виділена зона провідності, сірим - валентна зона; чорним – заборонена зона[2].

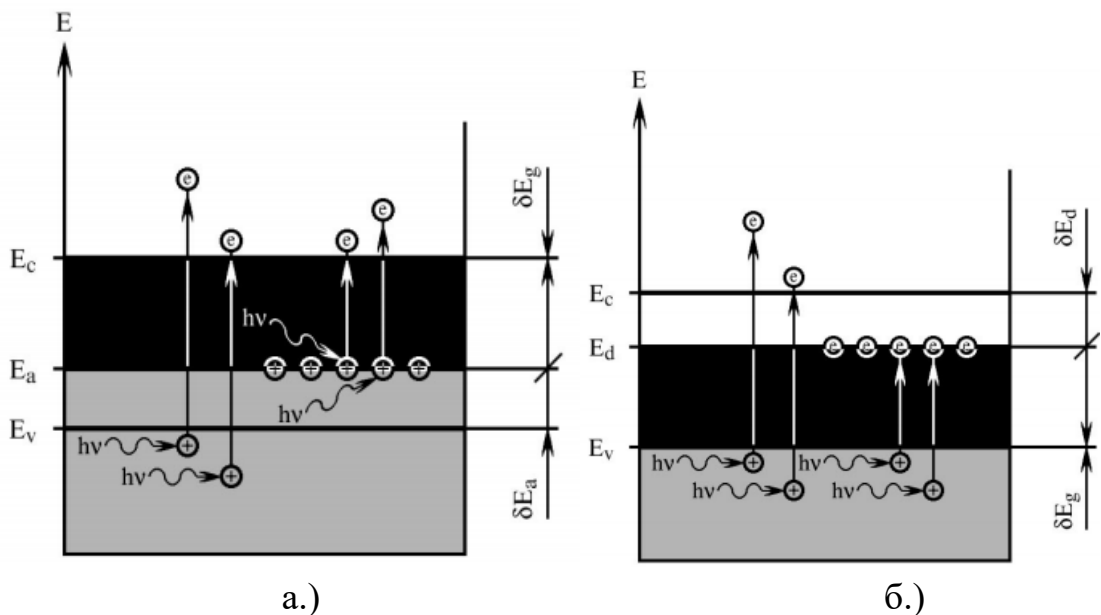


Рисунок 1.3. – Енергетична діаграма напівпровідника з домішковою провідністю: а.) р-типу. б.) n-типу[2].

Рис. 1.3. присвячений невластному або домішковому типу провідності. Такі які мають строго дозовані домішки - напівпровідники називаються домішковими. Ширина забороненої зони δE_g домішкового напівпровідника визначається його хімічним складом. Напівпровідник називають дірковим або р-типу, якщо домішка забирає електрони з зони провідності. Така домішка – акцептор електронів, і домінуючу роль в такій провідності грають дірки. Вони є основними носіями і формують основну – діркову - компоненту фотоструму. Напівпровідник називають електронним або n-типу, якщо домішка віддає електрони в зону провідності. Така домішка - донор електронів, і домінуючу роль в такій провідності грають електрони. У цьому випадку вони є основними носіями і формують основну - електронну - компоненту фотоструму. Присутність акцептора або донора в напівпровідниковому матеріалі проявляється на його енергетичній діаграмі (рис. 1.3.) у виникненні всередині вихідної забороненої зони нового рівня - рівня домішки $E_a = E_v + \delta E_a$ або $E_d = E_c - \delta E_d$, відповідно. У наведених виразах δE_a і δE_d - енергії активації акцепторного і донорного рівнів. В силу надзвичайно малої концентрації атомів домішки такі рівні залишаються дуже вузькими і не вироджуються в окрему зону. Проте, як впливає з порівняння рис. 1.2. з рис.1.3., саме наявність домішкового рівня звужує вихідну заборонену зону до $\delta E_g = \Delta E_g - \delta E_a$ або до $\delta E_g = \Delta E_g - \delta E_d$, що відкриває привабливу технологічну можливість ефективно регулювати фотопровідність. При цьому або - ініціюється механізм переходу електронів з валентної зони на акцепторні рівні (зростає діркова провідність - рис. 1.3.а.), або - ініціюється механізм переходу електронів з донорного домішкового рівня в зону провідності (зростає електронна провідність - рис. 1.3.б.).

Тепер в світлі викладених положень зонної теорії легше буде інтерпретувати і емпіричні кількісні закономірності внутрішнього фотоефекту.

По-перше, значення фотоструму прямо пропорційно освітленості при незмінному спектральному складі поглинається напівпровідником випромінювання (при фоторезистивному ефекті фотострум залежить ще і від напруги живлення, при фотодіодному - немає):

$$I_{\phi} = \Phi_e S_{\text{int}},$$

де I_{ϕ} – фотострум, А; Φ_e - поглинена потужність випромінювання, Вт; S_{int} - інтегральний (по спектру) коефіцієнт перетворення напівпровідника, А/Вт.

По-друге, у будь-якого напівпровідника є довгохвильова межа, що окреслює можливість реалізації внутрішнього фотоефекту (червона межа), бо фотопровідність може виникнути, якщо енергія фотона $h\nu$ достатня, щоб забезпечити електрон енергією для подолання забороненої зони $h\nu \geq E_g$. Червона межа спектральної чутливості напівпровідникових прийомних ПВП випромінювання на внутрішньому фотоефекті дорівнює: $\lambda_{\text{гр}} = \frac{h\nu}{\Delta\epsilon} = \frac{1.241}{\Delta E_g}$ мкм, де $\lambda_{\text{гр}}$ - гранична довжина хвилі монохроматичної засвічення, при якій виникає внутрішній фотоефект; $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с - постійна Планка; $c = 3 \cdot 10^{14}$ мкм/с - швидкість світла; ΔE_g - ширина забороненої зони, виражена в еВ.

По-третє, при ненульових температурах T червона межа внутрішнього фотоефекту розмивається за рахунок теплового розкиду швидкостей електронів, що поглинають фотон, - переходи електронів з зв'язаного стану у вільний можуть відбуватися не тільки через поглинання фотонів $h\nu$, що зумовлює появу фотопровідності, а із-за поглинання фононів, що супроводжується появою темної провідності напівпровідника, а також із-за поглинання квантів іонізуючих випромінювань [3]. Але, якщо останній механізм в фотометрії досить екзотичний, то темнова провідність часом може конкурувати з фотопровідністю - це, власне, і відбувається поблизу червоної межі. Дійсно, сукупність темної σ_{th} і фото- σ_{ph} провідностей визначається як:

$$\sigma_{th} + \sigma_{ph} = e[\mu_n(n_0 + \Delta n) + \mu_p(p_0 + \Delta p)]$$

де e - заряд електрона, μ_n і μ_p - рухливості електронів і дірок, n_0 і p_0 - концентрації термоіонізованих електронів і дірок, Δn і Δp - концентрації фотоіонізованих електронів і дірок. У той же самий час температурна залежність кожної провідності визначається як:

$$\sigma_{th,ph} = const \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{2kT}\right),$$

де $k = 1,3807 \cdot 10^{-23}$ Дж / К - постійна Больцмана; T – абсолютна температура, К. Зіставлення цих виразів показує температурне зростання питомої ваги темної компоненти в сигналі навіть при стаціонарної засвітці фотоприймача, тим більше при збільшенні довжини хвилі. Особливо відзначимо невластні напівпровідники, у багатьох з яких середня енергія теплових коливань решітки ($kT = 0,025$ еВ при кімнатній температурі) перевищує енергію активації відповідних рівнів. Отже, при $T = 20^\circ \text{C}$ домішкові атоми вже іонізовані термічно (якщо $\Delta E_g = 0,25$ еВ, їх частка становить близько 1%), тобто темнова провідність такого напівпровідника аж ніяк не нульова.

1.3. Теплове випромінювання

Нагріті тіла (тверді і рідкі) характеризуються безперервним розподілом випромінювання по спектру довжин хвиль з єдиним максимумом, положення якого залежить від температури джерела. Такі джерела називають тепловими, а тіла ці зазвичай знаходяться в стані термодинамічної рівноваги. Випромінювання полум'я або електричного розряду в газах не безупинно по спектру, а сконцентровано в вузьких інтервалах - лініях і смугах. Такі джерела називають селективними. Прикладами селективних випромінювачів є факели, двигуни літаків і ракет.

Фундаментальним поняттям при вивченні теплового випромінювання є поняття про абсолютно чорному тілі (АЧТ), тобто тіло, яке поглинає все падаюче на нього випромінювання будь-яких довжин хвиль.

Спектральний розподіл випромінювання АЧТ описується законом Планка:

$$W_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{ch/kT\lambda} - 1}$$

(1.1.)

Формулу (1.1.) зазвичай записують :

$$W_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{C_2/T\lambda} - 1}$$

де W_{λ} – спектральна густина випромінювання, $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1}$; λ – довжина хвилі, мкм; $C_1 = 2\pi hc^2 = 3,74 \cdot 10^4 \text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{мкм}^4$; $C_2 = \frac{ch}{k} = 1.44 \cdot 10^4 \text{мкм} \cdot \text{К}$;

Спектральна густина випромінювання АЧТ в діапазоні температур від 500 до 900 К показана на рисунку 1.4.

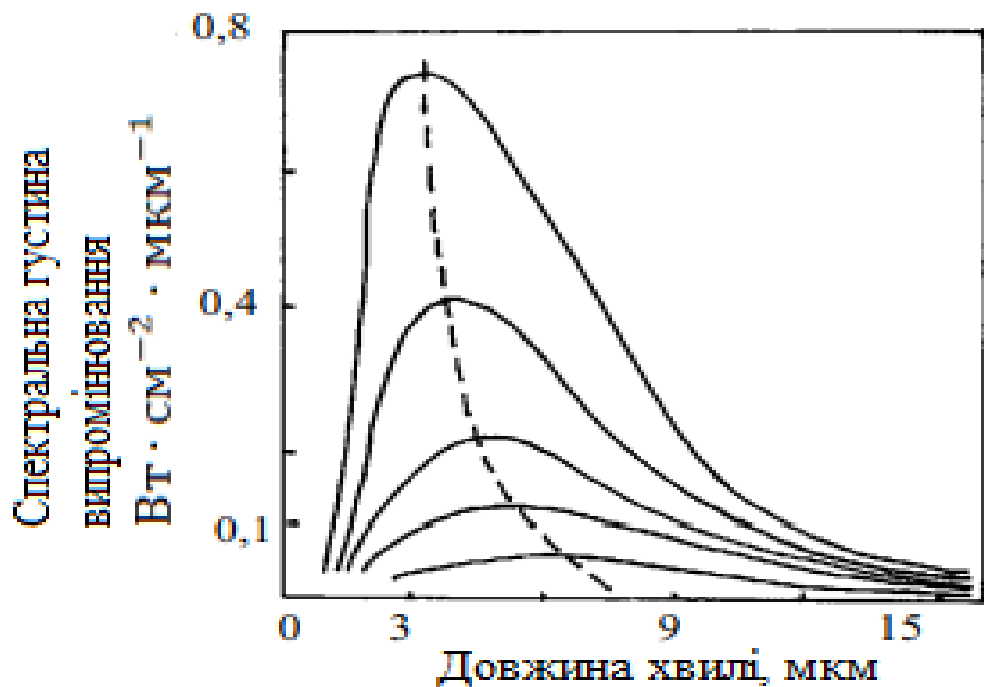


Рисунок 1.4. – Графік залежності спектральної густини випромінювання від довжини хвилі[3].

Із рис.1.4. видно що повний променистий потік , випромінюваний АЧТ , швидко зростає при збільшенні температури. Закон цього зростання можна отримати проінтегрувавши рівняння Планка:

$$w = \int_0^{\infty} w_{\lambda} d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4$$

Співвідношення називається законом Стефана-Больцмана, а σ -постійна Стефана-Больцмана:

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$$

Отже, повне випромінювання АЧТ зростає пропорційно T^4 . Продиференціювавши рівняння Планка отримаємо закон зміщення Віна:

$$\lambda_{\max} T = a,$$

де λ_{\max} – довжина хвилі, на якому спостерігається максимумальний розподіл спектральної густини випромінювання по довжинам хвиль, а $a = 2,898 \text{ мкм} \cdot \text{К}$ [5].

1.4. Мішені і фони

Збірним терміном "мішені" позначаються об'єкти, які повинні виявлятися ІЧ-системами або формувачами видимого зображення.

Турбореактивні двигуни (ТРД) літаків. Вони мають два джерела випромінювання: розпечену металеву трубу і струмінь вихлопних газів, звану "факелом". Температура факела ТРД становить $600-900^{\circ} \text{С}$, а коефіцієнт випромінювання $\varepsilon=0,9$, площа приблизно дорівнює площі сопла. Смуга випромінювання факела ТРД (CO_2) представлена на рис. 1.6., де 1 - результати спостережень; 2 - корекція на поглинання CO_2 атмосфери; 3 - апроксимація.

Є ще й друга смуга поглинання атмосферою (2,6-2,9 мкм), яка по спектральній яскравості слабкіше смуги 4,3 мкм в 2,5-10 разів (в залежності від видів палива). Однак вирішальним фактором вибору робочої смуги приймача являється рівень фону.

Ракетні двигуни (РД). Температура згоряння палива РД лежить в межах від 600 до 4500°С , а $\varepsilon = 0,9$. Для ракет з рідинним реактивним двигуном (ЖРД),

що працює на газі і рідкому кисні, температура згоряння рівна 3520 К, а розрахункова температура вихлопних газів - 1940 К; $\varepsilon = 0,9$.

Аеродинамічний нагрів. Літаки, що летять із надзвуковою швидкістю, нагріваються настільки, що випромінювання їх передньої півсфери легко можна знайти як в діапазоні 8-12 мкм, так і в діапазоні 3-5 мкм. Аналогічно, крилаті ракети, що летять в щільних шарах атмосфери зі швидкістю 700-800 км / год, випромінюють приблизно те ж передньою півсферою за рахунок аеродинамічного нагріву. Їх також можна виявляти в діапазонах 8-12 і 3-5 мкм.

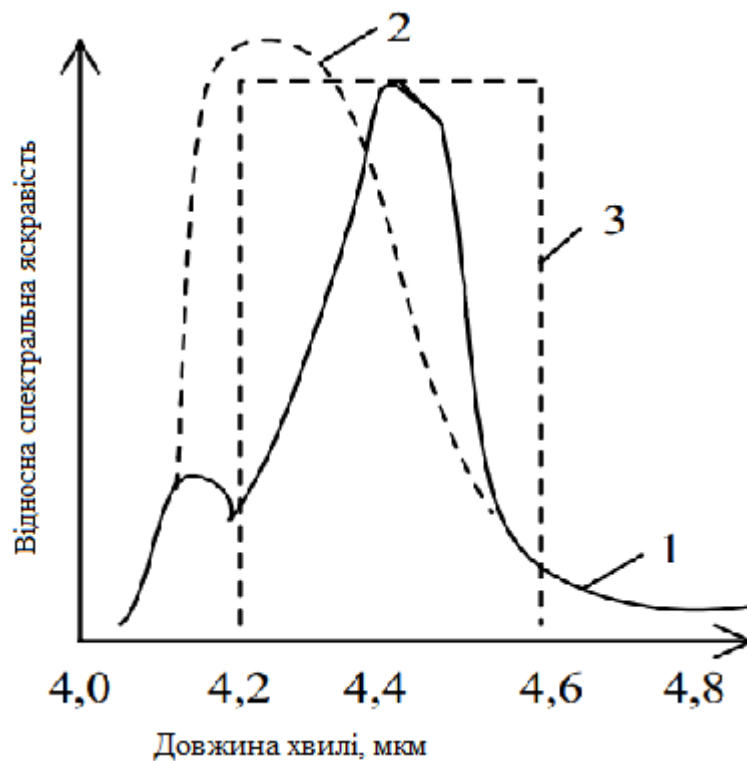


Рисунок 1.5. – Полоса випромінювання вихлопних газів ТРД[6].

Наземні транспортні засоби. Коефіцієнт випромінювання $\varepsilon = 0,85$ і вище. Працюючі двигуни виявляються в діапазоні 3-5 мкм, а холодні частини автомобілів - в діапазоні 8-12 мкм.

Зірки і планети. Більшість з найбільш яскравих зірок добре виявляється у видимій та ближній ІЧ-області спектра в нічних умовах. Максимуми власного випромінювання планет лежать в інтервалі від 3 мкм для Меркурія до 5 мкм для Місяця, Венери, Марса без урахування відбитого сонячного випромінювання.

Мішені звичайно спостерігаються на різних фонах, що ускладнює процес виявлення. Особливий інтерес представляють такі фони, як земна поверхню, небо, космос, зірки і планети.

Опис фонів представляє значні труднощі, особливо фон денної Землі (Рис. 1.6).

З рис. 1.6. видно, що максимум рівня фону Землі припадає на $\lambda=8 - 9$ мкм. Особливий випадок являє сніг - 1, від якого йде зеркальне відображення Сонця. Спектральна лучистість АЧТ: 35 °С - 2; ґрунту - 3; білого піску - 4; трави - 5. Спостерігається явний мінімум фону в районі 3 мкм. Цей мінімум ще, менший ніж в нічний час.

Взагалі для всіх ситуацій за допомогою інфрачервоних спектрометрів, установлених на штучних супутниках Землі (ШСЗ), постійно розробляються і уточнюються моделі фонів в усіх спектральних інтервалах. Точні дані про моделі фонів з явних причин строго засекречені.

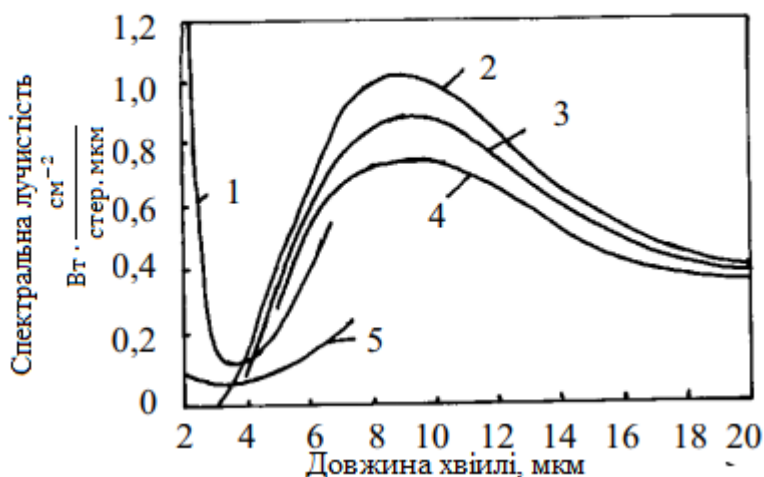


Рисунок 1.6. – Фон денної землі[6].

З рис. 1.6. явно видно мінімум випромінювання фону Землі в районі 3,0 мкм. Саме ця обставина і визначило той факт, що вся ІЧ-апаратура виявлення стартів балістичних ракет (БР) по випромінюванню їх факелів будується саме в діапазоні поблизу 3,0 мкм по першій ступені і поблизу 4,0 мкм - по другий. Фон

нічного неба простягається від 5 до 20 мкм і суттєвого вкладу в загальний фон не вносить[6].

Висновки до розділу:

Із всіх розглянутих моделей найкращий варіант для вибору – домішковий фотодіод на основі легованого InSb , оскільки він має високу квантову ефективність і водночас має необхідну нам спектральну чутливість та задовольняє умови точності .

2.ВИГОТОВЛЕННЯ ФОТОДІОДІВ

2.1. Полірування підкладок InSb

2.1. Хіміко-механічне полірування підкладок

Хімічне полірування поверхні InSb призначене для остаточного видалення порушеного шару, який утворився при абразивній обробці (розрізанні зливка на пластини, механічному шліфуванні та поліруванні), а також для зменшення шорсткості рельєфу поверхні до значень $R_z \leq 0,05$ мкм та неплоскостності до 1–2 мкм [8]. Наприклад, основний виробник матеріалу підкладок InSb у Росії ВАТ «Гиредмет» пропонує підкладки для епітаксії з такими параметрами: концентрація електронів $7 \cdot 10^{14} - 1 \cdot 10^{18}$ см⁻³ , діаметр 50,9 мм, товщина 498 ± 7 мкм, орієнтація поверхні $(100) \pm 0,20$, шорсткість робочої поверхні $\leq 0,01$ мкм, неплоскостність робочої поверхні $\leq 1,7$ мкм, густина дислокацій 100 мм [9]. Полірувальне хімічне травлення відноситься до ізотропного, при якому відбувається розчинення поверхні напівпровідника поряд із зменшенням (згладжуванням) виступів і западин його рельєфу, тобто зменшенням шорсткості поверхні. Швидкість полірувального травлення для різних кристалографічних площин може бути різною[6].

Принциповою особливістю напівпровідників A_3B_5 є суттєво різна швидкість травлення площин (111)А та (111)В [8]. Незважаючи на уявну легкість процесу полірувального хімічного травлення, його практична реалізація супроводжується появою дефектів, що призводить до високого процента відбракованих підкладок. Статистичний аналіз типів відмов напівпровідникових приладів показує, що біля 39% з них пов'язані зі способами обробки і підготовки поверхні напівпровідників [6].

Найбільш типовими недоліками хімічного травлення є неможливість збереження та відтворення геометричних розмірів та форми підкладок після їх абразивної обробки, порушення плоскопаралельності робочих поверхонь, заокруглення (завалювання) країв підкладки, поява хвиляподібної поверхні, яка називається «лимонною (або апельсиноюю) шкіркою», недостатня гладкість поверхні та ін. Більшість вищезазначених дефектів не характерна для самого методу, а є суб'єктивною – вони пов'язані, в основному, із порушеннями технологічних умов процесу полірування [6].

2.1.2. Хіміко-динамічне полірування.

Хіміко-динамічне полірування – процес, у якому рельєф поверхні зменшується лише завдяки хімічній дії травильного розчину. Згідно з [8] найбільш ефективний процес згладжування нерівностей поверхні напівпровідникового матеріалу відбувається при ламінарному русі потоку протравлювача, що забезпечує концентраційний градієнт у дифузійному примежовому шарі δ [6].

Виникнення морфології поверхні при ХДП напівпровідника типу «апельсинової шкірки» може свідчити або про порушення умов ламінарного потоку протравлювача відносно поверхні матеріалу, або про невідповідність середньої висоти нерівностей рельєфу поверхні, яка призначена для полірування, товщині дифузійного шару δ . За теорією розчинення твердих тіл у рідких протравлювачах будь-яка гетерогенна реакція умовно містить принаймні

три стадії: 1) перенесення інгредієнтів протравлювача до поверхні матеріалу; 2) хімічна реакція взаємодії компонентів матеріалу з реагентом; 3) відведення продуктів реакції із зони реакції [6]. Якщо загальну швидкість розчинення твердого тіла позначити V , а швидкості кожної із стадій відповідно V_1, V_2, V_3 , то формула для знаходження загальної швидкості гетерогенної реакції за правилом Маттісена набуває вигляду:

$$V^{-1} = V_1^{-1} + V_2^{-1} + V_3^{-1}, \quad (2.1.)$$

тоді для оцінки загальної швидкості гетерогенної реакції будемо мати:

$$V = V_1 V_2 V_3 / (V_2 \cdot V_3 + V_1 \cdot V_3 + V_1 \cdot V_2) \quad (2.2.)$$

З (2.2) видно, що найменша складова швидкості буде визначати загальну швидкість гетерогенної реакції розчинення матеріалу. У випадку, коли найменшу швидкість має підведення інгредієнтів протравлювача до поверхні або відведення продуктів реакції проводяться з найменшою швидкістю, процеси відбуваються виключно у дифузійному примежовому шарі δ , і тому вважають, що загальний процес розчинення матеріалу відбувається за дифузійною кінетикою. Якщо найповільнішою стадією є хімічна реакція взаємодії інгредієнтів протравлювача з компонентами поверхні матеріалу, вважають, що швидкість розчинення матеріалу відбувається за кінетикою хімічних перетворень, і відповідно називають кінетичною. У випадку, якщо швидкість переносу інгредієнтів протравлювача до поверхні матеріалу дорівнює швидкості хімічних перетворень на поверхні, вважають, що процес розчинення матеріалу відбувається за змішаною кінетикою [6].

Склад полірувальних травильних композицій наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Полірувальні протравлювачі для хімічної обробки InSb.

№ п/п	Кристаліграфічна орієнтація поверхонь	Склад, температура травлення T_{mp} , час травлення t_{mp}	Швидкість травлення, мкм/хв	Стан поверхні, стехіометрія	Посилання
1.	(100), (110)	$\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{H}_2\text{O} = 5:5:2$, $T_{mp} = 25-29\text{ }^\circ\text{C}$, $t_{mp} = 20\text{ с}$	–	–	[52]
2.	(100) (111)А (111)В	СР-4. $\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{HAc} = 5:3:3$, $T_{mp} = 20-30\text{ }^\circ\text{C}$, $t_{mp} = 5-30\text{ с}$	–	полірувальний для InSb, дзеркальна поверхня типу «апельсинова шкірка»	[52]
3.	(100), (110)	$\text{HF}:\text{H}_2\text{O}:\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_6:\text{H}_2\text{O} = (2-10):(5-20):(30-40)$, залишок вода, $T_{mp} = 20-30\text{ }^\circ\text{C}$	2–20 мкм/хв; висока швидкість травлення відповідає складу $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}:\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3 = 10:20:40$, залишок H_2O	полірувальний, відсутня окисна плівка, $R_z \leq 0,02\text{ мкм}$	[22]
4.	(100), (111)В	$\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{HAc}:\text{H}_2\text{O} = 2:1:1:10$, T_{mp} – кімнатна	~6 мкм/хв	поверхня дзеркальна, $R_z \sim 0,02\text{ мкм}$	[33,34]
5.	протравлювач для визначення полярності (111)А або (111)В	$\text{HF}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O} = 2:2:16$, T_{mp} – кімнатна	–	–	[40]
6.	(111)А, (111)В	$\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_6 = 4:1:25$, T_{mp} – кімнатна	–	дзеркальна поверхня вигляду «апельсинова шкірка». (111)А – більш дзеркальна	[40]
7.	протравлювач для (111)В; на стороні (111)А – круглі ямки	$\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}_2:\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6 = 1:14:20$ T_{mp} – кімнатна	–	(111)В має дзеркальний вигляд	[40]
8.	(100), (111)А, (111)В, (110)	винна кислота+ H_2O_2 +NaCl	хіміко-механічне полірування	$R_z \cong 0,03-0,05\text{ мкм}$, присутні оксидні форми Sb_2O_3 та In_2O_3	[31]
9.	–	$\text{HNO}_3:\text{HCl}:\text{H}_2\text{O} = (60-30):(50-15):(40-0)$, $T_{mp} = 296\text{ К}$, $\gamma = 120\text{ об/хв}$	1–27	дзеркальна, $R_z \cong 0,05\text{ мкм}$	[24]
10.	не залежить	$\text{HNO}_3:\text{HCl}:\text{CH}_3\text{COOH} = (30-60):(55-20):(40-0)$, $T_{mp} = 296\text{ К}$, $\gamma = 120\text{ об/хв}$	10–30	дзеркальна	[24]
11.	–	$\text{HNO}_3:\text{HCl}:\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6 = (10-74):(24-90):(0-22)$, $T_{mp} = 294\text{ К}$, $\gamma = 86\text{ об/хв}$	1–30	дзеркальна	[24]

2.2. Іона імплантація

2.2.1 Особливості та можливості методу іонної імплантації

Метод іонної імплантації заснований на впровадженні (імплантації) в тверде тіло прискорених в електростатичному полі іонізованих атомів і молекул. При цьому можливі будь-які комбінації іон-мішень. Енергія іонів може змінюватися від декількох кілоелектронвольт до гігаелектронвольт (тобто мільярдів електронвольт). Глибина впровадження іонів залежить не тільки від енергії, а й від маси іонів, а також від маси атомів твердого тіла. Так, середній пробіг іонів фосфору з енергією 10 кеВ в кремнії складає приблизно 14 нм, а іонів бору з енергією 1 МеВ близько 1756 нм. Іонне бомбардування дозволяє змінювати практично всі властивості приповерхностной області твердого тіла: електрофізичні, механічні (міцність, твердість, коефіцієнт тертя, зносостійкість), корозійні, каталітичні, оптичні, емісійні.

В останні роки іонна імплантація стала одним з основних методів введення домішок в напівпровідникові кристали. До цього часу найпоширенішими способами введення домішок були: введення домішок в процесі вирощування кристала (епітаксії), дифузія і сплавом. Епітаксія дозволяє нарощувати на вихідний кристал шари із заданою концентрацією домішок; дифузний метод заснований на дифузії домішкових атомів з поверхневого шару в напівпровідник. Нарешті, при сплаві прилеглий до поверхні шар напівпровідника розплавляють і в процесі подальшої рекристалізації (затвердіння) збагачують домішковими атомами.

На відміну від цих способів введення домішки в кристали, метод іонної імплантації не залежить перш за все від меж хімічної розчинності, а також від температури в процесі імплантації та концентрації матеріалу домішки на поверхні напівпровідника. Так як імплантація - процес термодинамічно нерівноважний, то з її допомогою можна створювати з'єднання і сплави, які принципово не можна отримувати традиційними методами, а також досягати

концентрацій впровадженої домішки, істотно що перевищують межу розчинності даної домішки в речовині мішені. Природно, що при сприятливих умовах впроваджені атоми також можуть вступати в хімічні зв'язки з атомами твердого тіла. Це можливо як в процесі опромінення, так і при подальшій технологічній обробці.

Концентрація впроваджених атомів домішки має деякий розподіл по глибині, яке в загальному випадку можна описати гаусовим (нормальним) розподілом з середнім проектувати пробігом R_p і стандартним відхиленням ΔR_p .

Метод іонної імплантації має ряд переваг, важливих як з технологічної точки зору, так і з точки зору проектування і створення нових типів електронних приладів і інтегральних схем:

1. Скорочення тривалості процесу введення домішки в 10^2 - 10^4 раз, однорідність розподілу по поверхні і відтворюваність параметрів.
2. Можливість точного контролю кількості вводяться атомів домішки простим інтегруванням струму іонів на мішень, що особливо важливо при низьких концентраціях (наприклад, зсув порогового напруги в МОП-транзисторах).
3. Висока чистота процесу, оскільки в прискорювачах іони поділяються за масами за допомогою мас-сепараторів.
4. Низька температура процесу.
5. Простота методів маскування ділянок на поверхні кристала, які слід або не слід легувати, шляхом застосування товстих оксидних, нітридних, металічних або фоторезистивної шарів.
6. Можливість легування через тонкі пасивуючі шари (наприклад SiO_2 або Si_3N_4).
7. Мала глибина впровадження іонів (зазвичай менше декількох мікрон, а іноді до десятків нанометрів), що дає можливість легування тонких приповерхневих шарів, з дуже крутим градієнтом концентрації домішки

(Наприклад для НВІС з субмікронними розмірами елементів, лавинно-пролітних діодів та ін.).

8. Багатоступінчасті імплантацією за допомогою зміни прискорює напруги можна створити профіль розподілу імплантованих атомів будь-який наперед заданої форми.

9. Завдяки незначному боковому розсіювання стає можливим виготовлення особливо мініатюрних приладів (субмікронних технологія), що володіють низькими паразитними ємностями.

До переваг методу слід віднести також універсальність, легкість управління іонними пучками за допомогою ЕОМ, тобто можливість повної автоматизації, а також, як зазначалося, можливість створення нерівноважних метастабільних систем, сумісність з процесами планарної технології.

У практиці застосування іонних пучків діапазон доз іонів на одиницю площі (іон / см²) залежить від змінюваною властивості твердого тіла і зазвичай охоплює область від 10¹¹ до 10¹⁸ іон / см². Методи реєстрації іонного струму на мішень часто дають інформацію про інтенсивність пучка в мккул / см² або іон / см²·с. Зв'язок між цими одиницями характеризується співвідношенням $1 \text{ мккул / см}^2 = 6 \cdot 10^{12} \text{ іон / см}^2 \cdot \text{с}$. Для того, щоб визначити інтегральну дозу опромінення поверхні зразка D (часто говорять просто дозу) необхідно інтенсивність пучка j помножити на час опромінення t,

$$D = jt .$$

Найбільш істотним недоліком іонного впровадження є порушення кристалічної структури напівпровідника, або металу (діелектрика) - поява дефектів в результаті первинних зіткнень іонів з атомами мішені або вторинних зіткнень вже зміщених з вузлів кристалічної решітки швидких атомів з іншими атомами матриці. Ці дефекти структури викликають зміну електрофізичних властивостей напівпровідників; крім того більшість імплантованих атомів займають нерегулярні положення в решітці і тому електрично не активні.

До другого недоліку методу іонної імплантації слід віднести невелику глибину легування, що критично для створення ряду електронних приладів,

наприклад, силових діодів і транзисторів. Підвищенням прискорює напруги до декількох MeV або десятків MeV можна збільшити глибину проникнення впроваджуваних атомів, однак такі установки виявляються дуже дорогими: 1 MeV - 1 млн. Доларів США, 2 MeV - 2 млн. Доларів і далі приблизно пропорційно. Слід зазначити також, що високоенергетичної імплантації супроводжує формування складних дефектів структури, які не відпалюються аж до температур, близьких до температури плавлення даного матеріалу.

До третього обмеження методу імплантації можна віднести такі ефекти, що з'являються в процесі або після імплантації як каналювання іонів і радіаційно - прискорена дифузія впроваджених атомів. Ці ефекти роблять майже неможливим теоретичне передбачення профілю. Найчастіше вони виявляються в більш глибокому проникненні імпантованих атомів і в більш складній ніж гауссова форма розподілу впроваджених атомів по глибині мішені.

Тому найважливішими проблемами методу іонної імплантації є: відпал радіаційних дефектів, підвищення електричної активації введених атомів, визначення форми розподілу імпантованих атомів домішок, а також дослідження впливу процесу імплантації на такі важливі характеристики вихідного матеріалу як рухливість і час життя носіїв струму (заряду).

Іонна імплантація в даний час широко використовується не тільки в області технології напівпровідникових приладів і ІС. Завдяки створенню сильночутливих імплантерів стало можливим не тільки легування напівпровідників (дози опромінення зазвичай менш 10^{16} іон / см^2), а й застосування її для модифікації хімічних, механічних і оптичних властивостей твердих тіл. При великих дозах впровадження ($D = \Delta \cdot 10^{16}$ іон / см^2), що досягають $n \cdot 10^{18}$ іон / см^2 , стає можливим перетворення поверхневого шару в інше хімічна сполука, наприклад, освіту карбіду кремнію при імплантації вуглецю в кремній або іонів кремнію в алмаз.

Широкий розвиток в останні роки отримала нове напрямок радіаційної фізики твердого тіла - іонна металургія. Іонні пучки в цьому випадку

використовуються для управління такими важливими для практики властивостями як: механічні, корозійні, надпровідні, каталітичні. Іншою можливою областю застосування іонної імплантації є виготовлення світловодів шляхом впровадження іонів в кварц, або арсенід галію, створення доменних структур на магнітоактивних матеріалах, тобто створення систем з магнітним записом інформації і ін.[14]

2.2.2. Устаткування для іонної імплантації.

Установки іонної імплантації бувають малих і середніх доз, а також великих доз з інтенсивними іонними пучками, високоенергетичні. Токи іонного пучка установок малих і середніх доз становить від одиниць мікроампер до 500 - 800 мкА, установок великих доз - від 1 до 200 мА. Обидва типи установок працюють в області енергій від 20 до 200 кеВ. Максимальна енергія високоенергетичних установок може перевищувати 1 МеВ.

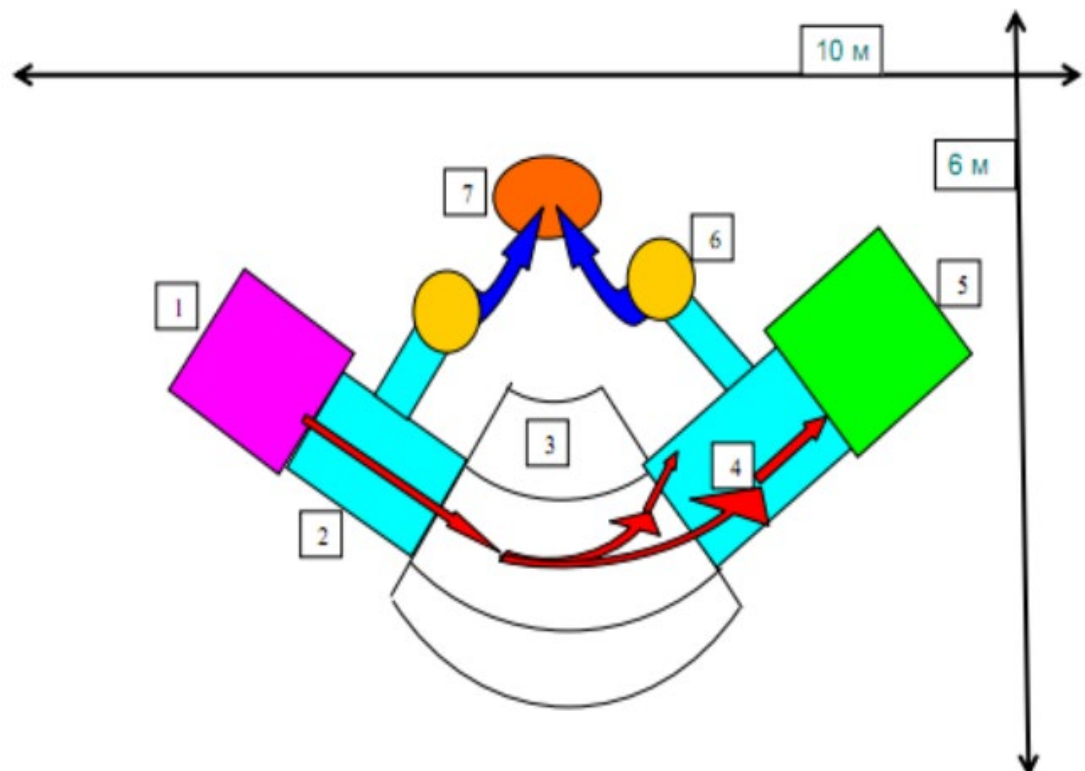


Рисунок 2.1. – Схема іонно-променевого прискорювача: 1 - джерело іонів, 2 - іонопровід, 3- магніт мас-сепаратора, 4 – траєкторія іонів, 5 – приймач іонів (колектор), 6 - насоси високого вакууму, 7 - форвакуумних насос [15].

Установки іонної імплантації (рис. 2.1.) зазвичай складаються з джерела іонів 1, іонопровода 2, магнітного мас-сепаратора 3, приймача іонів 5, насосів високого вакууму 6 і вакуумної системи. Відрізняються вони в основному потенціалом приймальної камери щодо землі і взаємним розташуванням приймальної камери, мас-сепаратора і джерела іонів.

а) Установки імплантації малих і середніх доз, енергія іонів в яких не перевищує 200 кеВ, а приймальня камера знаходиться під потенціалом землі, використовуються найбільш широко. Так як магнітна сепарація іонів здійснюється до прискорення, їх енергія в сепараторі низька, що робить істотний вплив на габарити установки (малі магніти, малопотужні джерела живлення електромагнітного сепаратора і прискорювальної системи).

б) Установку з поділом іонів по масах після прискорення зазвичай використовують для дослідницьких цілей. При високій роздільній здатності магнітного сепаратора і мінімальній кількості споживаної електроенергії високої напруги, в ній прискорюється весь пучок іонів, зростає струм навантаження високовольтного джерела живлення, а також збільшується вторинна електронна емісія, що підвищує небезпеку опромінення рентгенівськими променями.

в) Потужнострумові установка має просту систему управління і живлення джерела іонів, і електромагнітні, а також невелика кількість пристроїв, що працюють при високій напрузі. Недоліки її - важкий доступ до приймальні камері, високий потенціал на ній і складність автоматизації завантаження - вивантаження оброблюваних підкладок.

г) Високоенергетична установка дозволяє, приклавши високий потенціал до приймальні камері, отримати високу енергію іонів (500 кеВ і вище). В цьому випадку виникає сильне рентгенівське випромінювання. Велику енергію (1 - 2 МеВ і більше) простіше отримувати використовуючи багатозарядні іони.

д) В установці великих доз джерело іонів знаходиться під високою напругою. Повний прискорення відбувається в системі первинного формування пучка, що дозволяє повністю автоматизувати всі режими роботи.

Джерело іонів призначений для збудження атомів робочої речовини до енергії, як мінімум більшою потенціалу його іонізації, в результаті чого отримують пучок позитивно заряджених іонів. Оскільки для іонізації використовується електричний розряд, все джерела іонів мають однакові елементи:

- ⇒ розрядну або іонізаційні камеру ;
- ⇒ анод для створення електричного поля всередині розрядної камери;
- ⇒ джерело електронів , слугує для емітування в зону розряду необхідної кількості прискорених електронів;
- ⇒ магнітну систему для підвищення ефективності іонізації і щільності плазми в зоні екстракції (вилучення) іонів;
- ⇒ екстрагують електрод і електроди первинного фокусування пучка, призначені для вилучення іонів з зони плазми і первинного прискорення пучка іонів;
- ⇒ системи подачі (випаровування) робочої речовини і джерел живлення (анода, екстрактора, катода і електромагнітів).

Найбільш широко використовують джерела іонів з термокатодом прямого або непрямого напруження і менше - з холодним катодом.

Як робоча речовина в розрядну камеру джерела іонів подають такі гази, як водень, гелій, аргон, азот або газоподібні сполуки BF_3 , PH_3 і $AsFe_3$. При використанні твердих речовин, температура пароутворення яких не перевищує $1000^\circ C$ (олова, галію, сурми), їх попередньо нагрівають і створюють пари, які подають в джерело іонів через натікач, регулюючи швидкість випаровування зміною температури. Тверді речовини, температура пароутворення яких перевищує $1000^\circ C$, спочатку розпилюють в атмосфері аргону або ксенону пучком іонів цих газів, а потім іонізують в плазмі цього газу.

Мас-сепаратор служить для виділення із загального іонного пучка іонів необхідної маси і заряду. Сепараторами є секторні електромагніти, які крім того видаляють нейтральні атоми і молекули і компенсують просторовий заряд потужнострумового пучка. найбільш широко використовують секторні електромагніти з кутом повороту на 60° і 90° і неоднорідним магнітним полем. Такі електромагніти мають кращу дисперсію по масі, ніж електромагніти, які мають однорідне поле, а також дозволяють фокусувати пучок іонів в двох площинах і змінювати його фокусна відстань.

Фокусують пучки незалежно від маси іонів електростатичними квадрупольними або трьохелектродними лінзами.

Система прискорення і формування пучка найбільш часто є так званою прискорювальною трубкою, що складається з кільцевих скляних або керамічних ізоляторів і металевих електродів, спаяних, склеєних або стягнутих між собою. Ця система може також виконуватися у вигляді двох або трьохелектродних лінз для створення одно або двухпроміжного прискорення.

Системи сканування іонного пучка забезпечують рівномірне опромінення іонами всій поверхні мішені в приймальній камері. Сканування може бути електростатичне, електромагнітним, механічним або комбінованим. Для підвищення продуктивності установки необхідно вибрати оптимальну систему сканування, яка залежить від часу імплантації.

Для зменшення часу опромінення іонами можна збільшити струм пучка, що обмежується впливом просторового заряду і температури нагріву мішені. Встановлено, що при струмі понад 500 мкА пучок під дією власного просторового заряду в області, вільної від впливу електростатичних полів, починає розширюватися.

В електростатичних системах сканування збільшення перетину пучка іонів вимагає збільшення напруги, яка прикладається до пластин сканування. Електростатичне сканування використовують в слабкострумових установках з індивідуальною обробкою підкладок. Іонний пучок переміщається в площинах x і y відповідно з частотою від 100 до 500 і від 1000 до 4000 Гц, що створює

рівномірність легування. Недолік електростатичного сканування - необхідність збільшення загальної довжини установки для забезпечення однорідності легування великих по діаметру пластин.

Механічна система сканування являє собою колесо з закріпленими на ньому напівпровідниковими підкладками. При такій системі отримують постійний кут імплантації. Така система переміщення колеса виявляється досить складною.

Ця система забезпечує постійний кут імплантації і швидкість руху підкладок. Недоліки її - низька швидкість сканування по вертикалі, складність конструкції і необхідність використовувати пристрій, що працює в умовах вакууму, що погіршує вакуум. Однорідність легування одержують змінюючи щільність пучка або швидкість лінійного переміщення диска при збереженні його частоти обертання.

Комбіновані системи мають електромагнітне сканування у напрямку площині x і механічне у напрямку площині y і створюють найбільш сприятливі умови для рівномірності легування. Приймальна камера служить для розміщення, подачі і легування напівпровідникових підкладок. На установках малих доз підкладки обробляються поштучно. Завантажують їх в камеру вручну або автоматично через вхідний шлюз партіями по 25 штук, в касеті або на диску, а імплантують індивідуально. Установки з автоматичною подачею касет мають середню продуктивність 200 - 300 підкладок на годину при часу імплантації 5 - 10 с.

Установки малих і середніх доз, а також високоточні використовують також для групової обробки підкладок (барабанна система, наприклад). У високоточних установках виникає проблема відведення тепла від мішені, так як, наприклад, температура 90 - 120 ° С є критичною для фоторезисту. Проблему відведення тепла можна вирішити застосуванням підкладкотримача з гнучкого матеріалу з високою теплопровідністю або теплопровідних паст.

Системи дозиметрії служать для визначення дози вбитих іонів і рівномірності розподілу іонів по поверхні підкладки в процесі роботи

установок. В установках з електростатичним скануванням використовують циліндр Фарадея (рис. 2.2.), який служить для вимірювання дози іонів безпосередньо з поверхні ізолюваного підкладкотримача 4, з розміщеної на ньому підкладкою 5. У цьому випадку доза визначається загальним струмом, що проходить від захисних екранів і мішені до землі.

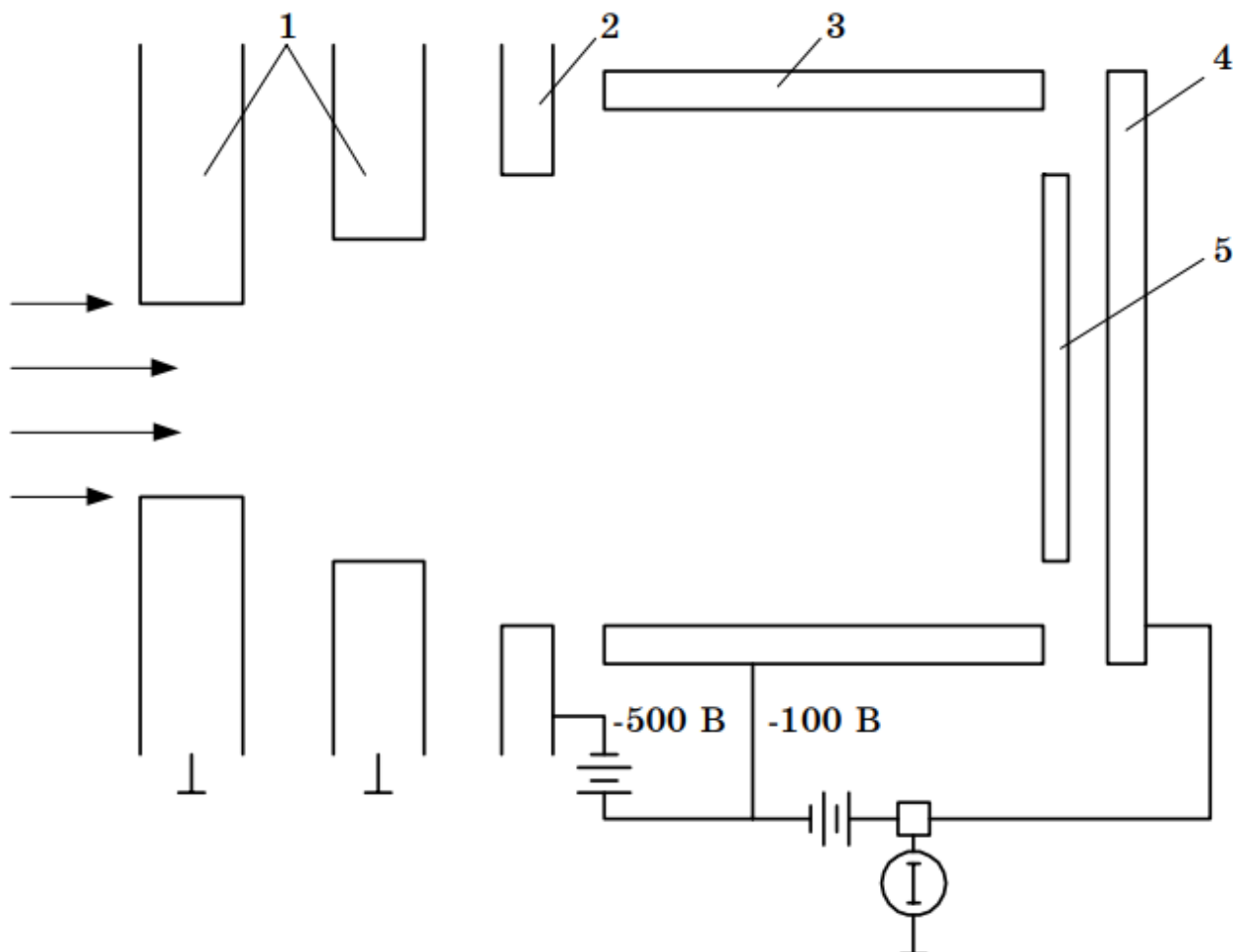


Рисунок 2.2. – Циліндр Фарадея: 1, 2 - заземлена і переважна діафрагми, 3 – корпус циліндра, 4 -підкладкотримач, 5 – підкладка [15].

В універсальних системах дозиметрії застосовують 4 незалежних циліндра Фарадея, розташованих в кожному куті растра, утвореного пучком іонів. виміряні дози інтегруються і порівнюються з середньою. якщо відхилення перевищує допустимі значення, процес легування зупиняється.

Вакуумні системи установок малих доз повинні забезпечувати вакуум не гірше 10^{-5} Па, а високоточних 10^{-4} Па.

Це обумовлено тим, що при довжині шляху іонів ≈ 1 м у вакуумній системі при вакуумних умовах, гірших зазначених вище, стають істотними процеси розсіювання іонів і їх перезарядки на атомах залишкових газів в установці. Найбільш поширені вакуумні агрегати з дифузійними насосами, які мають серйозний недолік – більшу ймовірність осідання на поверхні оброблюваних підкладок плівок вуглеводневих сполук. У деяких установках використовують безмасляні засоби відкачування: криогенні або магніторозрядні насоси, а також турбомолекулярні насоси, які практично не відкачують водень. Часто застосовують комбіновані вакуумні системи, що складаються з агрегатів з дифузійними насосами і пасткою з рідким азотом для відкачування джерела іонів і агрегату безмасляної відкачування приймальної камери.

До найбільш поширених промислових установок для іонного легування в країнах СНД відносять системи типу "Везувій", "Везувій-3 і 3М", "Везувій-5", "Везувій-7М", "Везувій-8 і 8М", "Везувій-9 і 9М", "Везувій-13", а також системи "Лада-20" і "Лада-30"[15].

2.3. Мас-спектроскопія вторинних іонів (ВІМС)

Мас-спектроскопія вторинних іонів (ВІМС) є відносно новим способом дослідження розподілу домішкових атомів в твердих тілах. Принципова схема установки з вакуумною камерою, іонним джерелом і аналізатором представлена на рис. 2.3. Поверхня зразка піддається іонному розпорошенню при опроміненні іонами з енергією в декілька кеВ. Частина розпорошених атомів електрично заряджена і може бути проаналізована з допомогою мас-спектрометра. Однак при використанні цього методу виникають такі проблеми:

- а) забезпечення сталості швидкості розпилення;
- б) отримання "плоского розпилення";
- в) підтримання сталості швидкості іонізації;
- г) вплив фону первинних частинок;

д) ефект атомів віддачі.

Велика перевага методу полягає в тому, що він дозволяє досліджувати всі елементи і має відносно високу чутливість, яка в залежності від елемента складає від 10^{15} до 10^{18} см⁻³.

Для забезпечення сталості швидкості розпилення іонів необхідно використовувати стабільне джерело. Розпилення можна робити за допомогою гостро сфокусованого пучка, що сканується по аналізованій поверхні, або за допомогою іонного пучка з постійною щільністю струму по його радіусу. У першому випадку є можливість додатково отримати картину зразка, у другому - полегшується завдання забезпечення "плоского" розпилення при проведенні аналізу на великих глибинах .

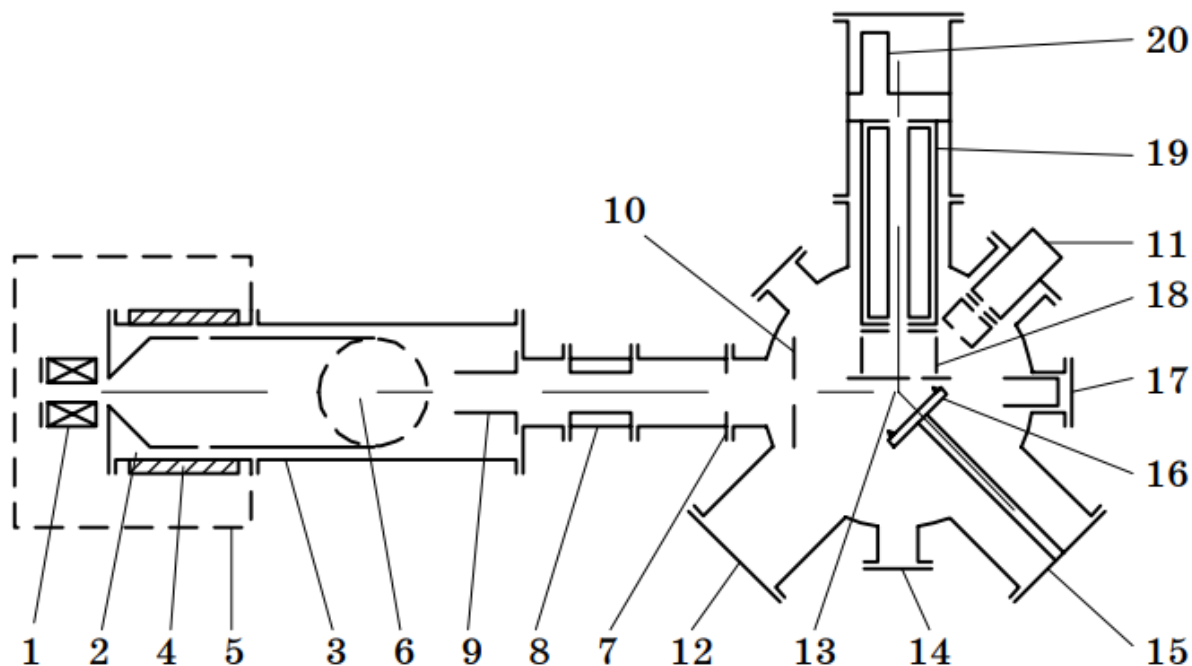


Рисунок 2.3. – Схема установки ВИМС: 1 - іонний джерело; 2 - витягуючий електрод; 3 - прискорюючий електрод; 4 - керамічний ізолятор; 5 - захисний кожух; 6 - турбомолекулярний насос; 7 - щілина для перепаду тиску; 8 - прохідний вентиль; 9 – відхиляючі пластини (2 пари); 10 - діафрагма; 11 - аналізатор залишкових газів; 12 - оглядове вікно; 13 - вакуумний насос; 14 - струмопідведення; 15 - пристосування для повороту мішені; 16 – тримач мішені; 17 - циліндр Фарадея; 18 - енергоаналізатор; 19 - квадрупольний массаналізатор; 20 - детектор.

Швидкість іонізації сильно залежить від складу газу на поверхні зразка. Зокрема, кисень може збільшити швидкість іонізації в 100 разів. Тому в деяких установках розпорошення проводиться іонами кисню. Якщо не робити цього, то завжди слід рахуватися з ефектом "розгону" (Тобто з уявною більш високою концентрацією домішкових атомів на поверхні), обумовленого неминучою присутністю на поверхні кисню. Дуже критичним для забезпечення сталості швидкості іонізації є також тиск у вакуумній системі, яка повинна бути нижче 10^{-5} Па. При високих прискорюють напружених, необхідних для отримання високої швидкості розпилення, стає помітним ефект атомів віддачі під дією бомбардують частинок. Як компроміс максимальну енергію бомбардують частинок приймають рівною 20 кеВ.

Якщо враховано вплив всіх перешкод, то профіль розподілу концентрації домішки за допомогою цього методу знаходять просто, підраховуючи кількість атомів домішки, розпорошених на відповідній глибині. Перемикання аналізатора на реєстрацію різних мас дозволяє одночасно вимірювати розподілу декількох домішок [16].

2.4. Відпал

Для усунення утворилися порушень, а також переведення імплантованих атомів в електрично активні положення в решітці (активації атомів домішки) необхідно проведення відповідних термообробок іонно-легованих зразків. Це може бути рівноважний відпал в печах, або нерівноважний (швидкий) фотонний, електронний, лазерний відпал. Відпал імплантованого кремнію проводиться при низьких ($400 - 600^{\circ}\text{C}$) або високих ($200 - 1000^{\circ}\text{C}$) температурах. При термічній обробці вище 1000°C одночасно з відпалом відбувається розгонка впроваджених атомів домішки.

При низькотемпературному відпалі зберігаються значні порушення, але їх міграція невелика. Так як ближче до поверхні підкладки знаходиться найбільша кількість дефектів, а не легуючих атомів, їх вплив на електрон-

дірковий (тобто p-n) перехід незначно. Тому низькотемпературним відпалом усуваються в основному порушення поблизу переходу, що забезпечує його високу якість. Низькотемпературний відпал застосовують в тих випадках, коли шари металізації, а також елементи напівпровідникових приладів і ІС не витримують високих температур.

При високотемпературному відпалі велика частина порушень відновлюється, але залишаються, як правило, великі і вплив їх при створенні приладів і ІС слід враховувати.

При температурі вище 1000 ° С одночасно з розгоном впроваджених атомів домішки іноді збільшується кількість дефектів і спостерігається їх поширення за межі імплантованою області. Це означає, що навіть високотемпературний відпал не гарантує повне усунення порушень кристалічної решітки.

Висновки до Розділу:

Проведено літературний огляд основних технологічних процесів виготовлення фотодіод, які найбільше впливають на дефектоутворення. Призначення ХМП та ХДП усунути зовнішні фізичні дефекти та обезжирити кристал перед імплантацією, що є найважливішим етапом виготовлення фотодіода. Після процесу імплантації необхідно провести відпал структури щоб усунути дефекти, які виникли після іонної імплантації. Оскільки температура плавлення InSb доволі низька (525°C), необхідно використовувати низькотемпературний швидкий термічний відпал (RTA).

ВІМС дає можливість перевірити правильність технологічного процесу, надаючи дані про розподіл хімічних елементів у структурі фотодіода.

3. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ І ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ФОТОДІОДІВ НА ОСНОВІ InSb.

3.1. Опис конструкції фотодіоду .

На першому етапі виконання дипломної роботи були виготовлені зразки ФЧЕ із наступними конструктивно-технологічними особливостями:

Розмір кристалу – $2,04 \times 2,04$ мм.;

Розмір активної області – $\varnothing 1,30$ мм.

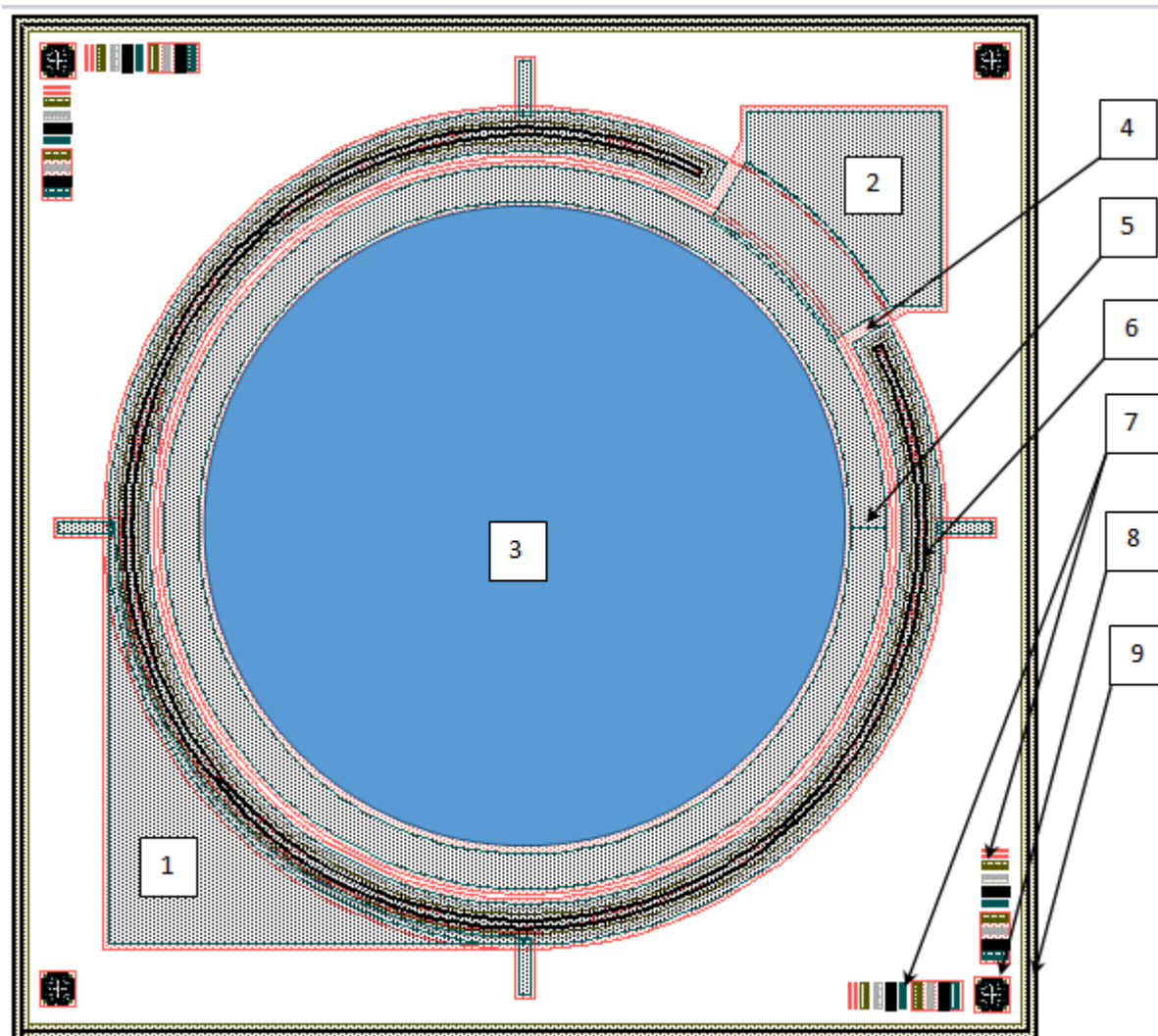


Рисунок 3.1. – Зовнішній вигляд кристалу:

1. Контактна область катоду фотодіода;
2. Контактна область аноду фотодіода;
3. Активна область аноду фотодіода
4. Охоронне кільце;
5. Омічний контакт до аноду фотодіода;
6. Омічний контакт до катоду фотодіода;
7. Знаки контролю лінійних розмірів в топологічних шарах;
8. Знаки суміщення фотолітографічних шарів ;
9. Зона скрайбування платівки на кристали .

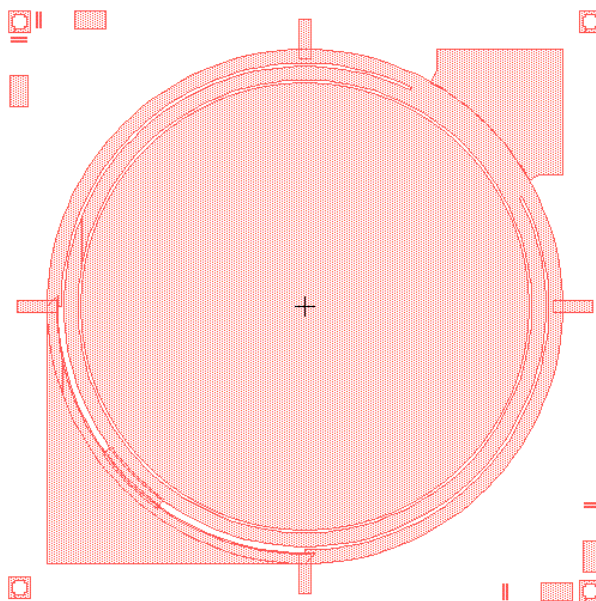


Рисунок 3.2. – Зовнішній вигляд топологічного шару «Меза». Мінімальний розміри в активній області: елемент - 40 мкм., Зазор між елементами - 10 мкм.

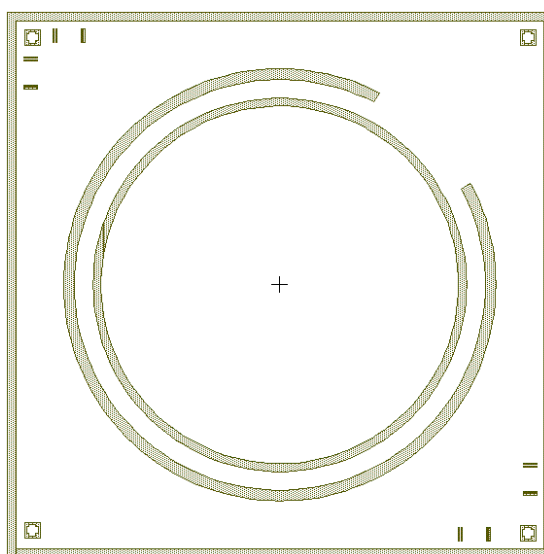


Рисунок 3.3. – Зовнішній вигляд топологічного шару «Технологічні контакти». Мінімальний розміри в активній області: елемент - 30 мкм., Зазор між елементами - 70 мкм.

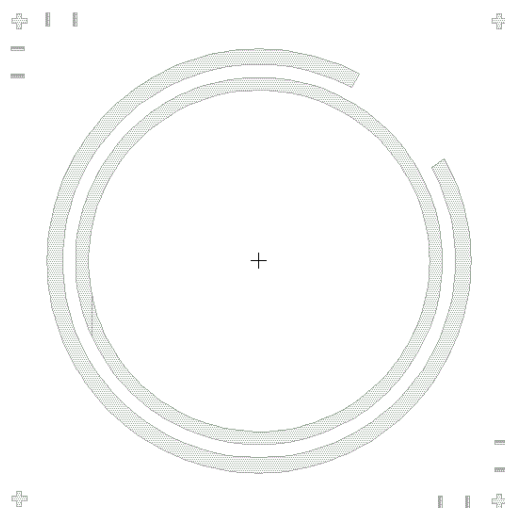


Рисунок 3.4. – Зовнішній вигляд топологічного шару «Металл1». (Cr)
Мінімальний розміри в активній області: елемент - 50 мкм., Зазор між елементами - 50 мкм.

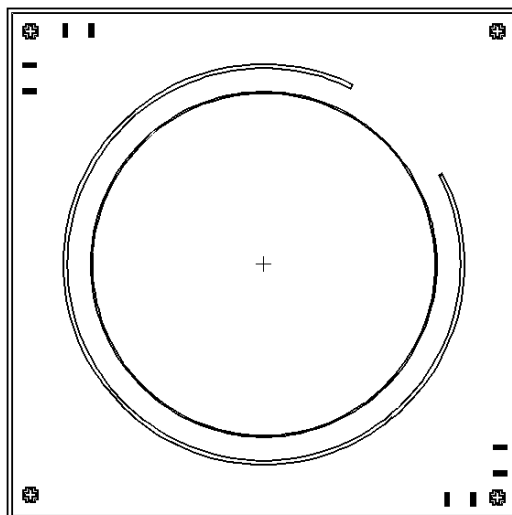


Рисунок 3.5. – Зовнішній вигляд топологічного шару «Контакти».
Мінімальний розміри в активній області: елемент - 10 мкм., Зазор між елементами - 90 мкм.

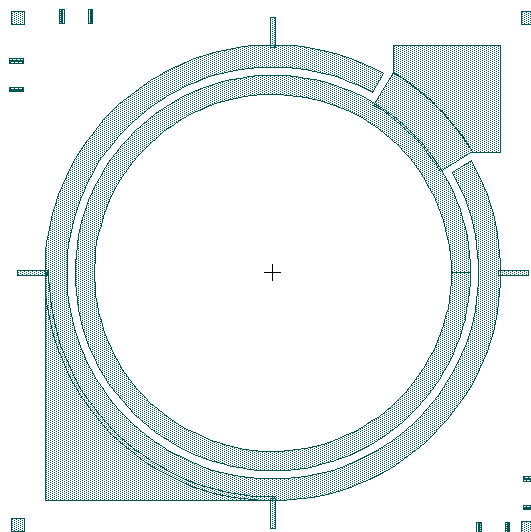


Рисунок 3.6. – Зовнішній вигляд топологічного шару «Металл2». (Au)
Мінімальний розміри в активній області: елемент - 20 мкм., Зазор між елементами - 25 мкм.

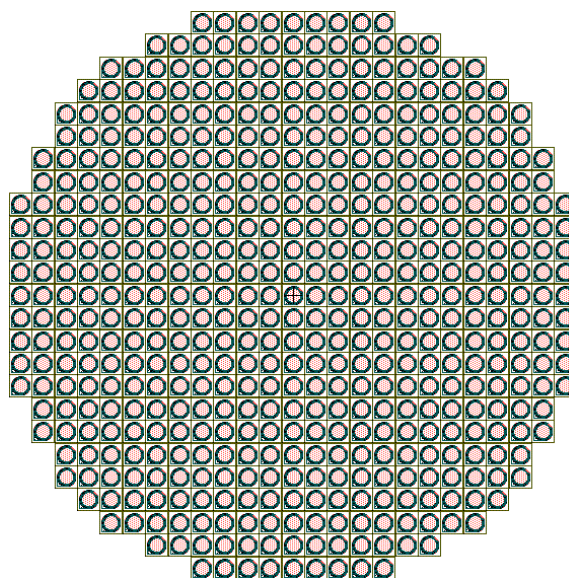


Рисунок 3.7. – Зовнішній вигляд робочого поля фотошаблону.
Розмір 51,0·51,0 мм.

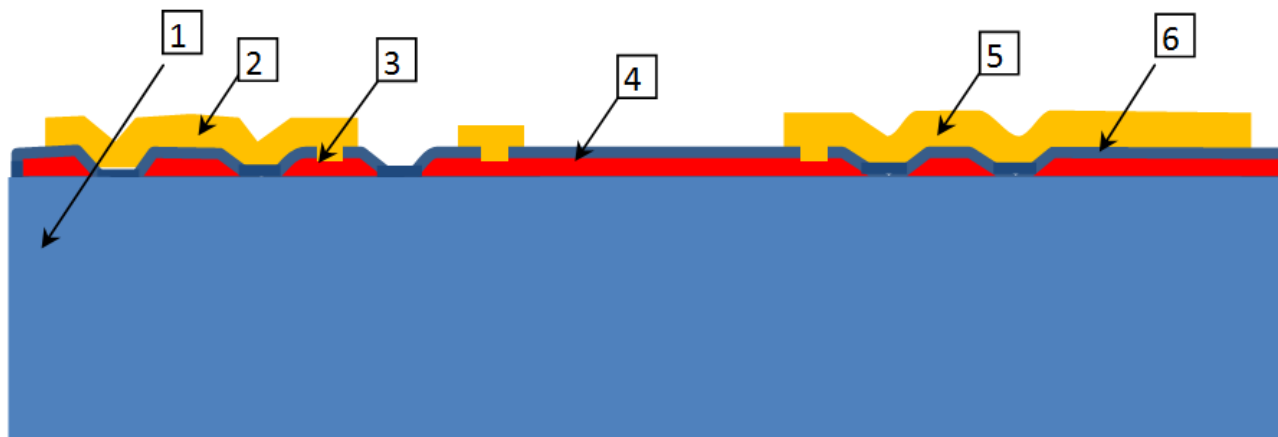


Рисунок 3.8. – Переріз кристалу фоточутливого елемента:

1. –платівка InSb n- типу провідності ;
2. – металева розводка катоду фотодіода та охоронного кільця;
3. – меза-структура охоронного кільця фотодіода p- типу провідності;
4. – меза-структура аноду фотодіода p- типу провідності;
5. – металева розводка аноду фотодіода;
6. – захисне покриття .

3.2.Технологічний маршрут виготовлення фотодіода.

Вихідна пластина фірми «Galaxy» Ø56mm InSb, n- типу провідності $n_e=(0,8\div 2,0)E14\text{ cm}^{-2}(111)B$.

Загалом етапи виробництва ми розглянули в попередньому розділі. Нижче (Таблиця 2) наводиться технологічний маршрут виготовлення досліджуваного фотодіода.

Таблиця 2 – Технологічний маршрут.

Назва операції	Технологічний режим	Параметри	Примітки
Розпакування пластин	Розпакування проводити безпосередньо перед процесом		Оригінальна пакувальна тара для пластин фірми «Galaxy»
Міжопераційний час збереження (МЧЗ)	Мінімальний час зберігання		(не більше 0,5 години)
Осадження SiO_2	$\text{SiH}_4 + \text{O}_2$	PECVD $T < 120^\circ\text{C}$ $\text{SiO}_2 = 175 \pm 25 \text{ nm}$	
Імплантація Mg^+	$E = 100 \text{ kV}$; $D = 1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$		
Хімообробка №1	Ізопропиловий спирт	$60 \pm 5^\circ\text{C}$ 30min	Видалення фізичних забруднень і знежирювання
Сушка	$(90 \pm 5^\circ\text{C})$ 20хв. сухим N_2		
Хімообробка №2	$\text{NH}_4 \text{ OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 1:4:20$	$65 \pm 5^\circ\text{C}$ 5min + обмивка в ДІ воді до омності 10 $\text{M}\Omega\text{m} \times \text{cm}$	Кінцеве знежирювання
Сушка	Центрифуга		
МЧЗ	Мінімальний час зберігання		(не більше 0,5 години)
RTA - 1	$T = 280^\circ\text{C} \div 120 \text{ s}$ (нагрів $-10^\circ\text{C}/\text{s}$, охолодження $-2,5^\circ\text{C}/\text{s}$ в Ar (N_2). Допускається охолодження до 120°C	Галогенні лампи з Si фільтром (ИК-1.0-1.2мкм)	Нагрів пластини с проімплантованої сторони
RTA - 2	$T = 380^\circ\text{C} \div 10 \text{ s}$ (нагрів $-10^\circ\text{C}/\text{s}$, охолодження $-2,5^\circ\text{C}/\text{s}$) в Ar (N_2) Допускається охолодження до 120°C	Галогенні лампи з Si фільтром (ИК-1.0-1.2мкм)	Нагрів пластини с проімплантованої сторони
МЧЗ	Мінімальний час зберігання		(не більше 3 годин)
Нанесення Ф/р	$d\text{Ф/р} = 1,2 \div 1,6 \text{ мкм.}$		
Сушка Ф/р	$(90 \pm 5^\circ\text{C})$ 10мин. сухий N_2		
ФЛ «Меза» (експонування)			Фоторезист Рис. 3.2.
Прояв і промивка в H_2O			

Сушка	Центрифуга		
Дублення	(115±5 ⁰ С) 20мин.сухий N ₂		
Травлення SiO ₂ + АО	[48% HF:40% NH ₄ F: H ₂ O=1:8:2]:H ₂ O =1:10		
Обмивка в H ₂ O			
Сушка	Центрифуга		
Реакційно-іонне травлення	Індуктивно пов'язане плазмореакційне іонне травлення InSb з використанням плазми CH ₄ /H ₂ /Ar	Межа - 0,5÷0,7мкм.	
Зняття фоторезисту в плазмі	O ₂ +He		
Зняття Ф/р	Аминостаноламин-2	3-и ванни: 1-22±2 ⁰ С; 2-105±5 ⁰ С; 3-70±5 ⁰ С	Послідовна обробка пластин в ваннах: 1-2-3-1
Обмивка в H ₂ O	В Д.І. H ₂ O до омності – не менше 10 МОм×см		
Сушка	Центрифуга		
МЧЗ	Мінімальний час зберігання		(не більше 3 годин)
Видалення SiO ₂ +АО	48% HF: H ₂ O=1:10		
Обмивка в H ₂ O			
Хімообробка №2	NH ₄ OH: H ₂ O ₂ :H ₂ O=1:4:20	65±5 ⁰ С 5min	
Обмивка	В ДІ H ₂ O до омності – не менше 10 МОм×см		
Сушка	Центрифуга		
МЧЗ	Мінімальний час зберігання		(не більше 0,5 години)
Осадження SiO ₂	SiH ₄ + O ₂	PECVD T<90 ⁰ С d SiO ₂ =150...2 00 nm	
МЧЗ	Мінімальний час зберігання		(не більше 3 годин)
Нанесення Ф/р	dФ/р=1,2÷1,6 мкм.		
Сушка Ф/р	(90±5 ⁰ С) 10мин. Сухий N ₂		
ФЛ «Технологічні Контакти» (Фоторезист Рис.3.3.

суміщення і експонування)			
Прояв і промивка в H ₂ O			
Сушка	Центрифуга		
Дублення	(115±5 ⁰ С) 20мин. Сушка N ₂		
Травлення SiO ₂	[48% HF:40% NH ₄ F: H ₂ O=1:8:2]:H ₂ O =1:10		
Обмивка в H ₂ O			
Зняття Ф/р	Аминоэтаноламин-2	3-и ванни	
Обмивка	H ₂ O до омності – не менше 10 МОм×см		
Сушка	Центрифуга		
МЧЗ	Мінімальний час зберігання		(не більше 3 годин)
Нанесення Ф/р			
Сушка Ф/р			
ФЛ «Me1» (суміщення і експонування)			Рис.3.4.
Прояв і промивка в H ₂ O			
Хімообробка №1 перед напиленням «Me1»	HCl : H ₂ O = 2:1	22±2 ⁰ С 30s + обмивка в ДІ воді до омності 10 МОм×см	Видалення анодного окисла.
Сушка	Центрифуга		
Напилення Cr		T<90 ⁰ С P<5×10 ⁻⁵ Па d Cr=50±10 nm.	
МЧЗ	Мінімальний час зберігання		(не більше 3 годин)
Видалення ф/р и Cr			“Lift-off”
Обмивка	H ₂ O до омности – не менее 10 МОм×см		
Сушка	Центрифуга		
Контроль зовнішнього вигляду	Не допускається відшаровування напилених плівок металу		

МЧЗ	Мінімальний час зберігання		(не більше 0,5 години)
Напилення SiO_x		$T < 90^\circ\text{C}$ $P < 5 \times 10^{-5} \text{Па}$ $d \text{ SiO}_2 = 500 - 800 \text{ nm.}$	
МЧЗ	Мінімальний час зберігання		(не більше 3 годин)
Нанесення Φ/p	$d\Phi/p = 1,2 \div 1,6 \text{ мкм.}$		
Сушка Φ/p	$(90 \pm 5^\circ\text{C})$ 10мин. Сухий N_2		
ФЛ «Контактні вікна» (суміщення і експонування)			Фоторезист Рис.3.5
Прояв і промивка в H_2O			
Сушка	Центрифуга		
Дублення	$(115 \pm 5^\circ\text{C})$ 20мин. сухий N_2		
Травлення SiO_x	48% HF: $\text{H}_2\text{O} = 1:10$		
д			
Обмивка в H_2O			
Зняття Φ/p	Аминоэтаноламин-2	3-и ванни	
Обмивка	H_2O до омності – не менше 10 $\text{МОм} \times \text{см}$		
Сушка	Центрифуга		
МЧЗ	Мінімальний час зберігання		(не більше 3 годин)
Підбивна фотолітографія по «Au»			
Нанесення Φ/p			
ФЛ «Me2» (суміщення і експонування)			Фоторезист Рис.3.6
Прояв і промивка в H_2O			
Хіміобробка перед напиленням «Me2»	$\text{HCl} : \text{H}_2\text{O} = 2:1$	$22 \pm 2^\circ\text{C}$ 30s + обмивка в ДІ воді до омності 10 $\text{МОм} \times \text{см}$	
Сушка	Центрифуга		
МЧЗ	Мінімальний час зберігання		(не більше 0,5

			години)
Напилення Au		$T < 90^{\circ}\text{C}$ $P < 10^{-5}\text{Па}$ $d\text{Au} = 500 \dots 800\text{ nm.}$	
МЧЗ	Мінімальний час зберігання		(не більше 3 годин)
Видалення ф/р і Au			“Lift-off”
Обмивка	H_2O до омности – не менше $10\text{ МОм} \times \text{см}$		
Сушка	Центрифуга		
Контроль зовнішнього вигляду	Не допускається відшаровування плівки Au		
Упаковка пластин			

Висновки до розділу:

На основі аналізу наукової літератури, патентів та зразків фотоприймачів провідних фірм нами розроблено оптимальну конструкцію приймача і запропоновано базовий технологічний процес. Дана технологія як видно є схожою до технології виготовлення ФЕП. Як і для ФЕП виникає проблема із затіненням поверхні металевими контактами і відповідно зниження робочої площі, тому у якості альтернативи до класичних металевих контактів можна використати прозорий провідний оксид який має провідність як у металу проте є прозорим. Така заміна контактів збільшить робочу область датчика при тій самій площі кристалу.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

4.1. Розрахунок профілів впровадженої домішки методом Монте-Карло

З розвитком обчислювальної техніки профілі впровадженої домішки для різних комбінацій іон-мішень стало можливим розраховувати чисельно. Найбільшого поширення набув метод випадкових величин, названий Монте-Карло. Останніми роками отримала міжнародне визнання комп'ютерна програма SRIM. На сьогоднішній день є кілька її версій, одна з яких використовується в даній роботі.

Суть методу Монте-Карло полягає в розіграші через генератор випадкових чисел важливих для будь-якого процесу параметрів. В разі іонного впровадження такими параметрами є вільний пробіг між зіткненнями для падаючого іона і його прицільну відстань перед зіткненням з атомом мішені. Решта величини, такі як щільність і склад мішені, атомні маси, початкова енергія іона, енергія зміщення атомів мішені, товщина мішені, задаються постійними на перших кроках реалізації програми. Комп'ютер простежує траєкторію кожного іона, послідовно вирішуючи завдання про зіткнення двох заряджених частинок. При цьому кожен раз реєструються наступне: втрата енергії на ділянці вільного пробігу, втрата енергії при зіткненні з атомом мішені, кут відхилення від первісного напрямку, виліт атома мішені з вузла (якщо енергія віддачі більше енергії зміщення). Потім ситуація розігрується заново з урахуванням події зіткнення. Як критерій зупинки зазвичай вважають умову: залишкова кінетична енергія рухомого іона не перевищує енергію зміщення атома мішені. На цьому етапі комп'ютер фіксує координати іона.

Сучасні версії програми SRIM дозволяють отримувати реквізити не тільки про розподіл впровадженої домішки, але про проведені зсувах, про розподіл вакансій і міжвузлових атомів, про розпиленні мішені. Для отримання параметрів розподілу імплантованою домішки і точкових дефектів необхідно виконати велику серію подібних випробувань, зазвичай рекомендується кілька тисяч (число випробувань задається на початку програми).

У даній роботі за допомогою програми SRIM розраховували у кристалі n-InSb легованого магнієм при енергії 100 kV такі величини:

- Ion Ranges - розподіл іонів в мішені, вимірюється в(Атом / см^3) / (Атом / см^2)). Для отримання концентрації іонів необхідно цю величину помножити на їх дозу.

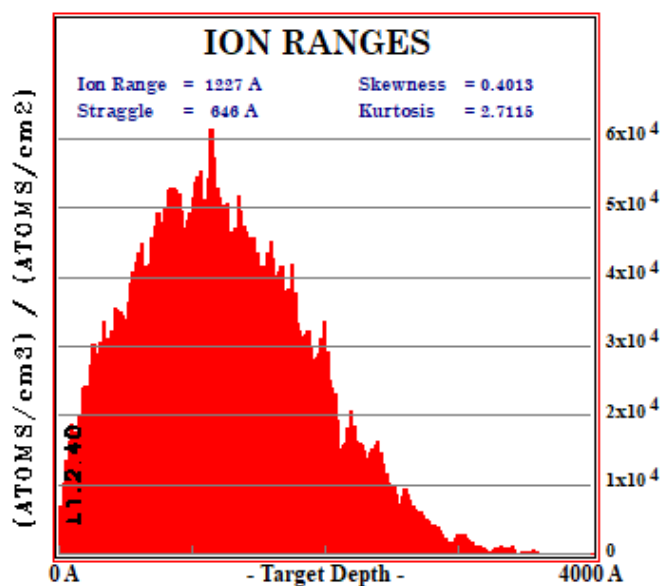


Рисунок 4.1. – Графік розподілу іонів Mg^+ в мішені.

- Ionization - енергія, передана електронам мішені. Дані, позначені «Ions» відповідають за передачу енергії безпосередньо від іонів, «Recoils» - від атомів віддачі.

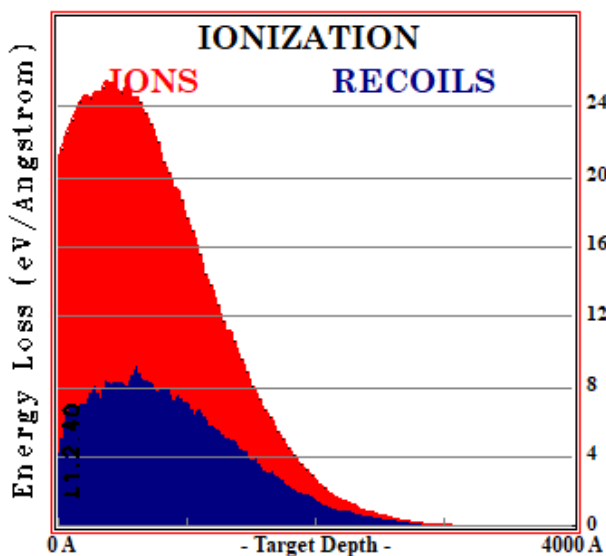


Рисунок 4.2. – Графік розподілу енергії, переданої електронам мішені.

- Phonons - енергія, передана іонами і атомами віддачі на утворення фононів.

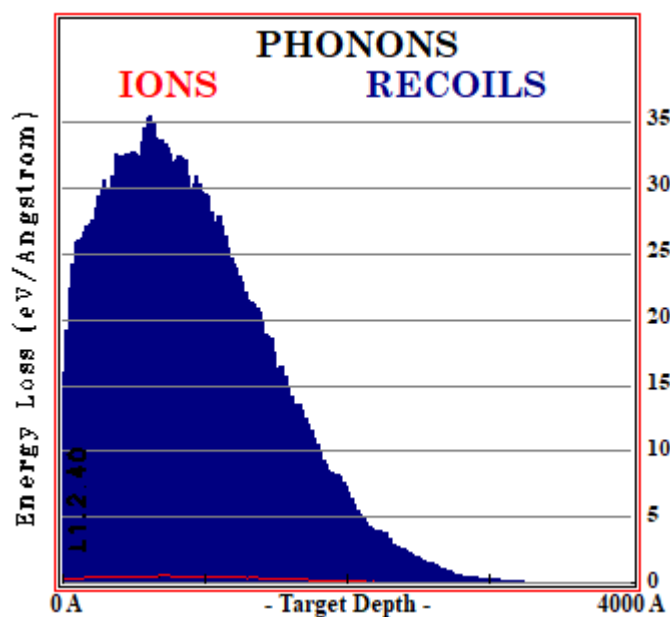


Рисунок 4.3. – Графік розподілу енергії , переданої іонам і атомам віддачі на утворення фононів.

- Energy to Recoils - енергія, передана іонами атомів мішені.

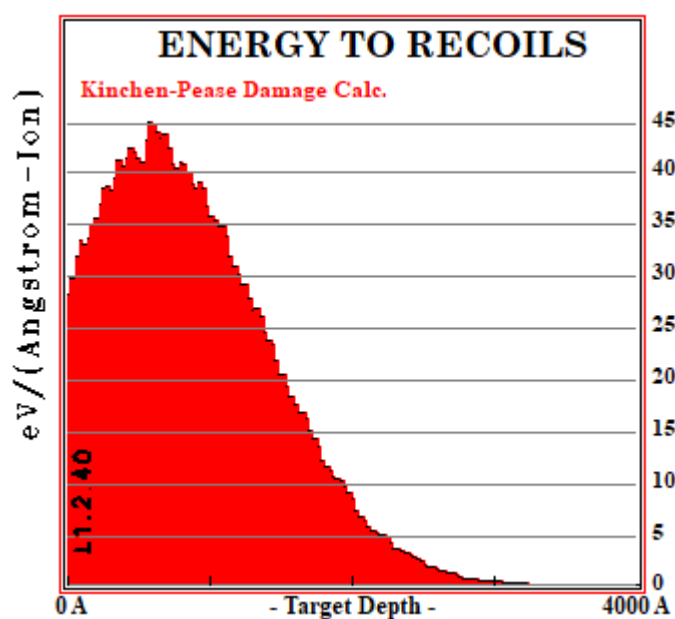


Рисунок 4.4. – Графік розподілу енергії , переданої іонами атомів мішені.

- Collision Events - розподіл вакансій в мішені.

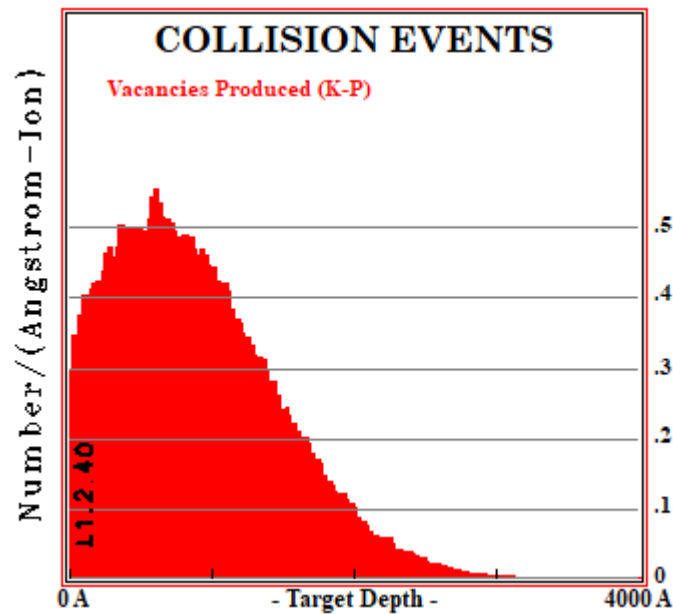


Рисунок 4.5. – Графік розподілу вакансійних дефектів.

З отриманих результатів можна стверджувати, що при іонному легуванні з енергією 100 kV ОПЗ залягатиме на глибині до 3000 Å. Що є оптимальним для нас значенням при використанні іонів магнію.

Оскільки виникає велика кількість радіаційних дефектів (Рис.4.2-4.5), які необхідно усунути, після процесу легування необхідно провести термічний відпал і зняти шар матеріалу на глибину 1300 Å. Цього вистачить щоб усунути більшу частину дефектів і дозволить пристрою функціонувати в стаціонарному режимі.

4.2. Дослідження профілів розподілу берилію в імплантованих зразках

В технології створення чутливих ІЧ фотоприймачів найбільш критичною технологічною операцією є формування р/п переходу. Контроль розподілу домішок проводиться з використанням сучасних мас-спектрометричних методів, які дозволяють реєструвати профілі розподілу домішок з високою чутливістю та роздільною здатністю по глибині.

В даній роботі проводилося дослідження профілів розподілу Mg в InSb методами мас-спектрометрії вторинних іонів (BIMC). BIMC має високу чутливість, великий динамічний діапазон та роздільну здатність по глибині. В наших експериментах, домішка Mg вводилася в зразки кремнію та InSb методом іонної імплантації з енергією від 100 keV та дозою $1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$.

Досліджувані зразки являли собою SiO_2/InSb структури. Ряд експериментів по відпрацюванню методик створення структур та методик мас спектрометричного аналізу проводилися на кремнієвих зразках. Це пов'язано з великою вартістю пластин InSb і «дешевизною» кремнієвих (використані методи аналізу є руйнівні). Проте для вирішення значної кількості поставлених задач цього виявилось достатньо.

В ВІМС методі, розпилення поверхні зразків первинним іонним пучком проводилося в режимі прямокутного растра $200 \text{ мкм} \times 200 \text{ мкм}$ під кутом падіння - 45° . Енергія та струм пучка первинних іонів O_2^+ складали 12.5 кеВ та 1 мкА, відповідно

На рис.4.6 . представлено ВІМС профілів розподілу елементів Mg, C, O, Al, Si. Видно, що після імплантації спостерігається характерний розподіл Mg по глибині. Крім того, на поверхні присутня алюмінієва плівка, яка зникає в процесі розпилення На рис.4.7. представлено ВІМС профіль розподілу домішки Mg в SiO_2/InSb структурі. Видно, що характерний профіль розподілу Mg знаходиться одразу за SiO_2 інтерфейсом в InSb підкладці. Саме така структура і планувалася для виготовлення. Однак недостатня чутливість методик не дозволила на даному етапі прописати більш якісні профілі розподілу магнію.

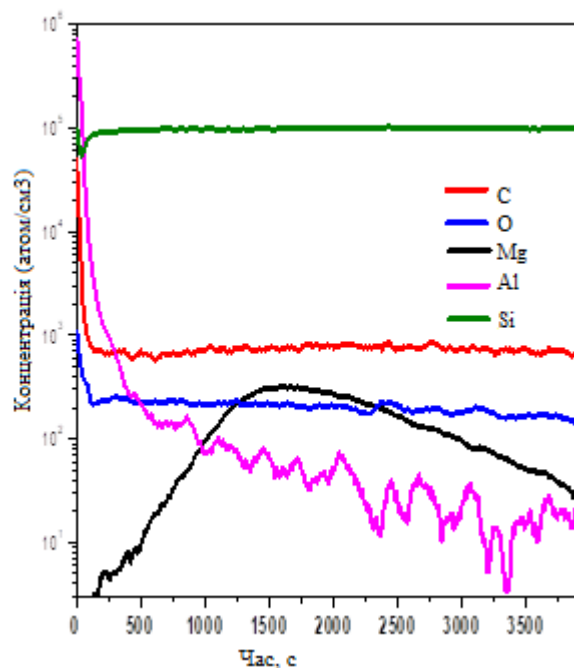


Рисунок 4.6. – Профілі розподілу елементів в кремнієвій підкладці.

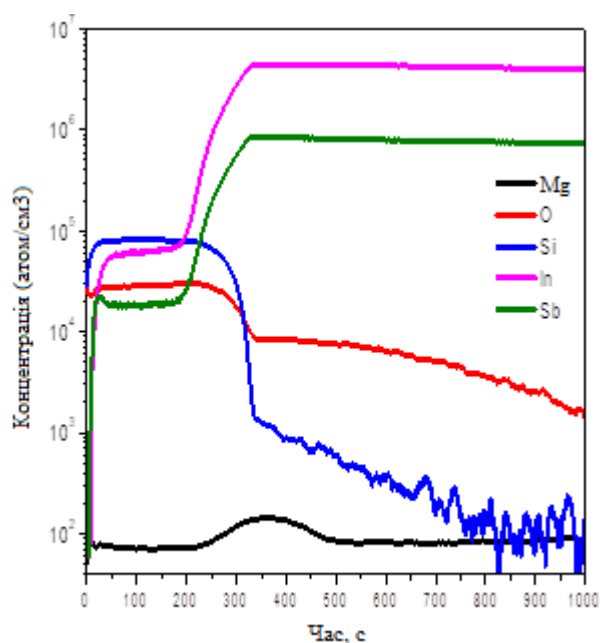


Рисунок 4.7. – Профілі розподілу елементів в InSb.

4.3. Дослідження ВАХ отриманих фотодіодів

Далі на вимірювальному пристрої Л2-56 досліджувалась ВАХ виготовлених фотодіодів та якісні характеристики їх фоточутливості до впливу електро-магнітного випромінювання, утвореного макетним джерелом:

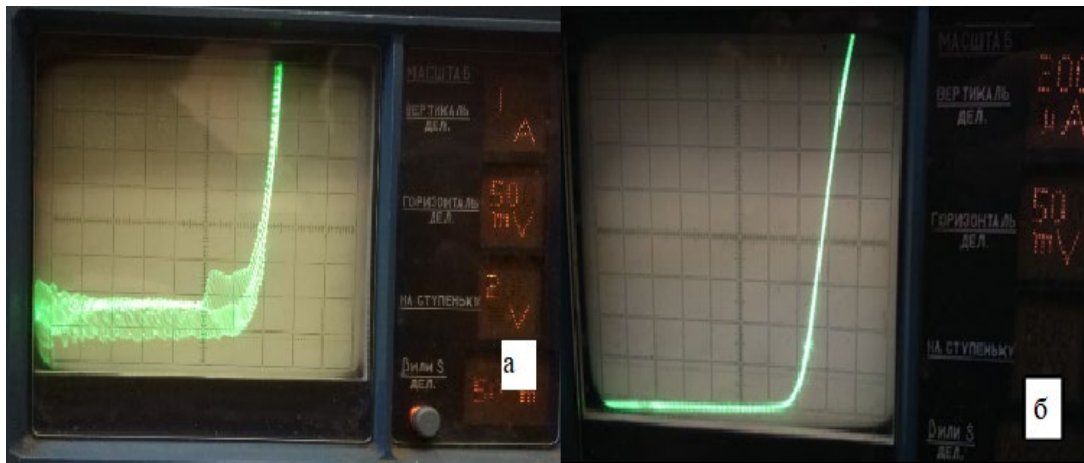


Рисунок 4.8. – ВАХ фотодіода при $T=77\text{K}$ без опромінення (а) та в умовах опромінення макетним джерелом (б).

Для оцінки отриманих результатів по фоточутливості діодів, в тих же умовах була виміряна напівтаблетка фотодіоду «САРНА» з вмонтованими інтерференційним фільтром та кварцевою діафрагмою:

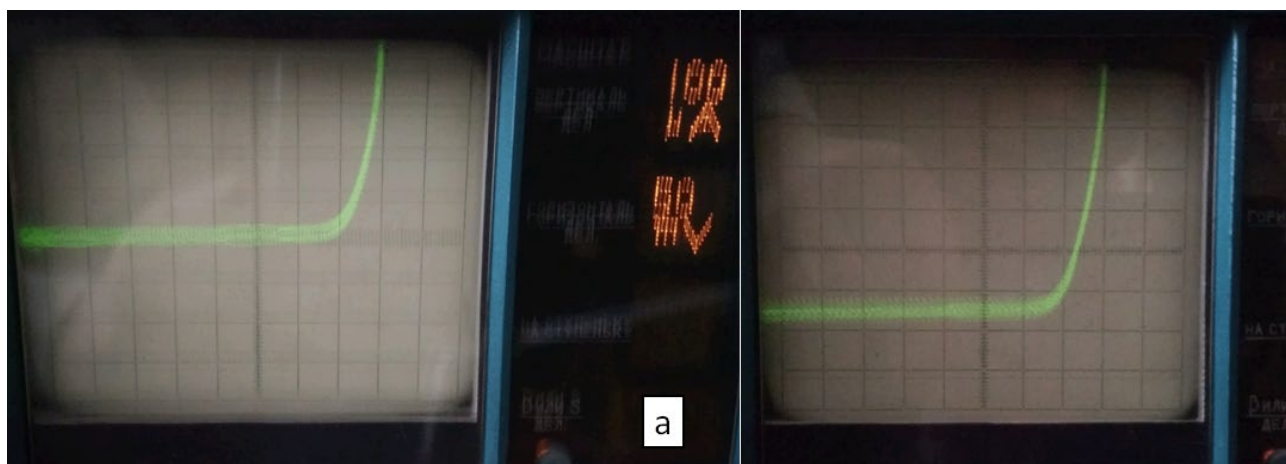


Рисунок 4.9. – ВАХ напівтаблетки фотодіоду «САРНА» при $T=77K$ без опромінення (а) та в умовах опромінення макетним джерелом (б).

З рис. 4.8 та 4.9 отримуємо інтегральний фототовідклик $580\mu A$ для фотодіодів і $150\mu A$ – для напівтаблетки фотодіоду «САРНА». Таким чином, інтегральна чутливість діодів в 4 рази вища за той же параметр на напівтаблетці фотодіоду «САРНА».

Після зварювання золотих контактів до фотодіода ми отримали ВАХ зображену на рис. 4.10

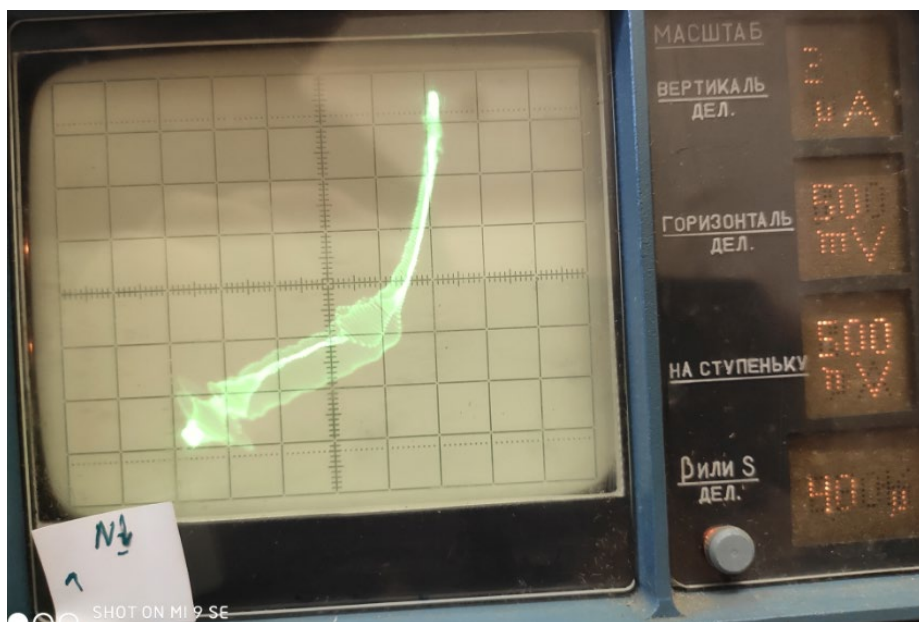


Рисунок 4.10. – ВАХ фотодіода після зварювання контактів.

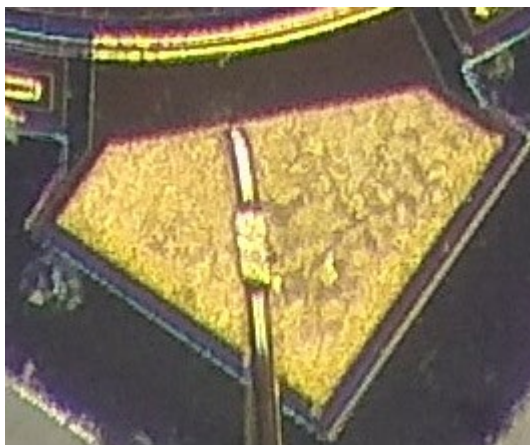


Рисунок 4.11. – Фото після зварювання контактів.

Висновки до розділу:

Розрахунки за допомогою програмного забезпечення SRIM надали уявлення про те, як має виглядати профіль розподілу Mg у матеріалі, іонізація атомів, вакансійні дефекти. Це дало змогу правильно вибрати енергію імплантації, концентрацію атомів домішки і технологічний режим відпалу.

Аналізуючи результати отримані із методу ВІМС зображені на рис. 4.6.-4.7. переконались, що вони відповідають розрахунковим, хоча значення графіків розподілу у програмі SRIM відносні. Це дозволяє нам усвідомити, що технологічний маршрут був складений правильно. При дослідженні ВАХ після процесу зварювання золотих контактів спостерігається незадовільний результат. Хоча перед цим ми спостерігали ВАХ робочого фотодіода із некритичними шумами. Це обумовлено неправильним способом зварювання. На рис.4.11. видно, що при зварюванні прикладалась велика механічна напружка, а оскільки кристал InSb має слабку механічну стійкість швидше за все це і викликало порушення кристалічної ґратки і в наслідок незадовільну ВАХ.

ВИСНОВКИ

В результаті виконаної роботи отримано фотодіод на основі InSb з використанням імплантації іонів магнію. На основі аналізу наукової літератури, патентів та зразків фотоприймачів провідних фірм розроблено оптимальну конструкцію приймача і запропоновано базовий технологічний маршрут.

При дослідженні зразків було отримано такі параметри та відомості: оптимальним значенням енергії імплантації Mg в підкладку InSb є 100 кеВ ; ОПЗ залягає на глибині до 3000 Å; основна кількість дефектів розміщується на глибині до 1300 Å; оптимальним методом усунення дефектів є низькотемпературний швидкий термічний відпал (RTA); інтегральний фототовідклик становить 580μA;

Під час конструювання і виготовлення було виявлено дві проблеми. Проблема із затіненням поверхні металевими контактами і відповідно зниження робочої площі. У якості альтернативи до класичних металевих контактів можна використати прозорий провідний оксид який має провідність як у металу проте є прозорим. Така заміна контактів збільшить робочу область сенсора при тій самій площі кристалу. Та проблема процесу зварювання золотих контактів, який руйнує кристалічну ґратка матеріалу , що в свою чергу викликає негативну зміну ВАХ . Тому при зварюванні потрібно використовувати удосконалений метод розщепленого електрода .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРИ

1. Рогальский А. Инфракрасные детекторы. Новосибирск: Наука, 2003. 636 с.
2. А.В. Войцеховский, И.И. Ижнин Физические основы полупроводниковой фотоэлектроники
3. Епифанов Г.И. Физика твердого тела. – М.: Высшая школа, 1977. 288с.
4. Васильев А.Ф., Чмутин А.М. Фотоэлектрические приемники излучения: Учебное пособие. Изд. 2-е, пересмотренное. – Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2010. 80 с.
5. Формозов Б. Н. Аэрокосмические фотоприемные устройства видимого и инфракрасного диапазонов: Учеб. пособие. 2-изд., перераб. и доп./СПбГУАП; БГТУ "Военмех"; СПб., 2004. 127 с.
- 6.А.В. Сукач, В.В. Тетьоркін, І.М. Матіюк, А.І. Ткачук InSb ФОТОДІОДИ (ОГЛЯД. ЧАСТИНА II), 2016. 90 с.
- 7.А.В. Сукач, В.В. Тетьоркін, І.М. Матіюк, А.І. Ткачук1 InSb ФОТОДІОДИ (ОГЛЯД. ЧАСТИНА I), 2016. 68 с.
- 8.Луфт Б.Д., Перевощиков В.А., Возмилова Л.Н. и др. Физико-химические методы обработки поверхности полупроводников. М.: Радио и связь, 1982. 136 с.
9. Мирофянченко А.Е., Коротаев Е.Д., Яковлева Н.И. Исследование морфологии поверхности полупроводниковых подложек InSb, предназначенных для ИК-фотоэлектроники. Прикладная физика. 2014. №3. С. 55–60.
10. Перевощиков В.А. Процессы химико-динамического полирования поверхности полупроводников. Высокочистые вещества. 1995. №2. С. 5–29.
11. Перевощиков В.А., Скупов В.Д. Особенности абразивной и химической обработки поверхности полупроводников. Нижний Новгород: ННГУ, 1992. 206 с.

12. Кисельова Л.В., Лопухин Ю.С. и др. Влияние режимов химической обработки монокристаллов InSb на состав и структуру поверхности. Прикладная физика. 2015. №5. С. 84–89.

13.. Эминов Ш.Щ. Химическое травление поверхности плоскостей {111} InSb при подготовке к жидкостной эпитаксии. Fizika. 2009. 15, No. 2. С. 96–100.

14. Ф. Ф. Комаров Ионная и фотонная обработка материалов : учебное пособие . 296 с

15.Карзанов В.В., Королев Д.С. Ионное легирование кремния: Практикум. Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2013. – 21 с.

16.Білінський Й.Й., Аналіз сучасних багатоеlementних фотоприймальних пристроїв та оптикоелектронних методів і засобів на їх основі. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2005. № 5